

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**Condições Meteorológicas Sinópticas e de
Mesoscala durante Episódios de Poluição
Atmosférica por Matéria Particulada na Área da
Grande Lisboa**

**Dissertação submetida à Universidade de Évora para obtenção do
grau de Mestre em Clima e Ambiente Atmosférico**

Clara Cristina Moita Lebre de Freitas

**Orientadores: Prof. Doutor João Corte Real e Prof. Doutor
Francisco Ferreira**

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri

Évora – Janeiro 2006

UE
159
551

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**Condições Meteorológicas Sinópticas e de
Mesoscala durante Episódios de Poluição
Atmosférica por Matéria Particulada na Área da
Grande Lisboa**

**Dissertação submetida à Universidade de Évora para obtenção do
grau de Mestre em Clima e Ambiente Atmosférico**

Clara Cristina Moita Lebre de Freitas



**Orientadores: Prof. Doutor João Corte Real e Prof. Doutor
Francisco Ferreira**

159 551

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri

Évora – Janeiro 2006

Ao Jorge e à Ana

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todas as pessoas que directa ou indirectamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

À Eng. Luísa Nogueira da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo pela sua disponibilidade.

Ao Eng. Hugo Tente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Ao Dr. Paulo Sérgio Lúcio e Dr. Nuno Belo da Universidade de Évora.

Aos meus colegas do Instituto de Meteorologia: Nuno Moreira, Margarida Belo, Manuel João Lopes, Sílvia Antunes, Paulo Pinto, João Ferreira e Luís Pinto Coelho.

À Divisão de Previsão Numérica do Instituto de Meteorologia, e especificamente à Maria José Monteiro pela permissão de acesso a correr o modelo ALADIN.

À Dra. Teresa Abrantes por me ter apoiado nos momentos de stress.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	5
ÍNDICE	7
RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO	21
2.1 Matéria particulada na atmosfera	21
2.1.1 Identificação	21
2.1.2 Propriedades físicas e químicas.....	22
2.1.3 Distribuição espacial e temporal da matéria particulada à superfície..	37
2.2 Enquadramento legislativo	40
2.3 Caracterização climática de Portugal Continental.....	42
2.4 Impactes da matéria particulada.....	43
2.4.1 Impactes na saúde	43
2.4.2 Impactes no ambiente	46
3 METODOLOGIA.....	51
3.1 Análise às séries temporais de partículas inaláveis - PM ₁₀	51
3.2 Análise à influência da meteorologia nas concentrações de partículas inaláveis - PM ₁₀	54

4	RESULTADOS	61
4.1	Análise às séries temporais de partículas inaláveis - PM ₁₀	61
4.2	Análise à influência da meteorologia nas concentrações de partículas inaláveis - PM ₁₀	67
4.2.1	Análise meteorológica sinóptica, de mesoscala e local aos episódios	81
4.2.1.1	Episódio de 5 a 8 de Novembro de 1999.....	81
4.2.1.1.1	Análise meteorológica sinóptica	82
4.2.1.1.2	Análise de trajectórias	85
4.2.1.1.3	Análise meteorológica local.....	87
4.2.1.1.3.1	Observações meteorológicas de altitude (sondagens aerológicas) 87	
4.2.1.1.3.2	Observações meteorológicas de superfície	89
4.2.1.1.4	Resumo.....	92
4.2.1.2	Episódio de 26 a 28 de Fevereiro de 2000	93
4.2.1.2.1	Análise meteorológica sinóptica	93
4.2.1.2.2	Análise meteorológica de mesoscala	97
4.2.1.2.3	Análise de trajectórias	98
4.2.1.2.4	Análise meteorológica local.....	100
4.2.1.2.4.1	Observações meteorológicas de altitude (sondagens aerológicas) 100	
4.2.1.2.4.2	Observações meteorológicas de superfície	102
4.2.1.2.5	Resumo.....	104
4.2.1.3	Episódio de 30 de Maio a 1 de Junho de 2002.....	105
4.2.1.3.1	Análise meteorológica sinóptica	105
4.2.1.3.2	Análise meteorológica de mesoscala	108
4.2.1.3.3	Análise de trajectórias	109
4.2.1.3.4	Análise meteorológica local.....	111

4.2.1.3.4.1	Observações meteorológicas de altitude (sondagens aerológicas)	111
4.2.1.3.4.2	Observações meteorológicas de superfície	112
4.2.1.3.5	Resumo.....	115
4.2.1.4	Episódio de 23 a 25 de Julho de 2002.....	116
4.2.1.4.1	Análise meteorológica sinóptica	116
4.2.1.4.2	Análise meteorológica de mesoscala	118
4.2.1.4.3	Análise de trajectórias	120
4.2.1.4.4	Análise meteorológica local.....	122
4.2.1.4.4.1	Observações meteorológicas de altitude (sondagens aerológicas)	122
4.2.1.4.4.2	Observações meteorológicas de superfície	124
4.2.1.4.5	Resumo.....	127
4.2.1.5	Episódio de 28 a 31 de Dezembro de 2002.....	128
4.2.1.5.1	Análise meteorológica sinóptica	128
4.2.1.5.2	Análise meteorológica de mesoscala	130
4.2.1.5.3	Análise de trajectórias	132
4.2.1.5.4	Análise meteorológica local.....	132
4.2.1.5.4.1	Observações meteorológicas de altitude (sondagens aerológicas)	133
4.2.1.5.4.2	Observações meteorológicas de superfície	133
4.2.1.5.5	Resumo.....	137
4.2.1.6	Intercomparação dos episódios descritos.....	137
5	CONCLUSÕES	139
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
	ANEXO A. Resumo do modelo das retro-trajectórias(KNMI)	151
	ANEXO B. Campos dos modelos ECMWF e ALADIN	157

ÍNDICE DE FIGURAS	163
ÍNDICE DE TABELAS	173

RESUMO

O presente estudo analisa a associação entre partículas inaláveis (PM_{10}) à superfície e determinadas situações meteorológicas, com base em dados (1999-2003) de concentração de partículas finas e grosseiras de estações de qualidade do ar da região de Lisboa e observações meteorológicas.

Associaram-se os episódios de poluição a situações sinópticas, com base em cartas de superfície do modelo do Centro Europeu de previsão a médio prazo (ECMWF). Os episódios que ocorrem com maior frequência no Inverno estão associados a um anticiclone. Depressões de origem térmica e vales que se estendem do Norte de África ocorrem poucas vezes, mas a probabilidade de se verificar um episódio com essas situações é elevada.

Para cinco destes episódios analisaram-se campos do modelo ECMWF (escala sinóptica) e do modelo ALADIN (mesoscala). As elevadas concentrações de partículas associadas aos episódios estudados resultaram de uma forte influência do nível 850 hPa, corroborados pelo modelo de retro-trajectórias do KNMI.

ABSTRACT

Synoptic and Mesoscale Meteorological Patterns during PM Events in Lisbon Area

The present study analyses the relationship between particles (PM_{10}) and specific meteorological patterns based on fine and coarse particles concentration data (1999 to 2003) from the Lisbon area air quality network and meteorological observations.

Associations were established between PM_{10} events and synoptic patterns based on surface fields from European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) Model. Winter events occur mainly under high pressure conditions. Thermal lows and troughs over North Africa affecting the Iberian Peninsula occur less frequently; however, the probability of a PM event with this synoptic pattern is high.

Meteorological fields from the ECMWF model (synoptic scale) and the ALADIN model (mesoscale) were analyzed for five of these episodes. The 850 hPa level is quite relevant for determining high PM_{10} concentrations at the surface, as confirmed by KNMI trajectory model.

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo tem como objectivo verificar se determinados episódios de matéria particulada na atmosfera (partículas inaláveis - PM_{10} e respiráveis - $PM_{2.5}$) à superfície se poderão associar a situações meteorológicas típicas.

A matéria particulada é o termo geralmente usado para designar as partículas sólidas ou líquidas existentes no ar, de origem natural ou antropogénica.

Identificaram-se os episódios de poluição por PM_{10} e associaram-se os episódios de poluição às situações sinópticas respectivas, com base em cartas sinópticas de superfície do modelo global do Centro Europeu.

Efectuou-se, ainda, um estudo mais aprofundado para cinco destes episódios, no período de 1999 a 2003. Para o efeito, analisaram-se, ao nível da escala sinóptica, campos meteorológicos do modelo ECMWF e posteriormente ao nível da mesoscala, campos obtidos do modelo ALADIN (Aire Limitée Adaptation International), com o intuito de construir o cenário meteorológico mais próximo do real associado a esses episódios e verificar se o modelo de área limitada permitiu melhorar a interpretação de resultados. Recorreu-se também à análise de trajectórias da partícula (modelo KNMI).

A utilização dos campos do modelo ALADIN foi útil fundamentalmente num dos episódios considerados (23 a 25 de Julho de 2002) em que se verificou o desenvolvimento de fenómenos de mesoscala (brisas de mar).

Os campos do geopotencial aos 850 hPa do modelo ECMWF e as trajectórias a este nível permitiram explicar o transporte de partículas do Norte de África associado aos

episódios de 5 a 8 de Novembro 1999, de 26 a 28 de Fevereiro de 2000 e de 30 de Maio a 1 de Junho de 2002.

A pertinência deste trabalho, deve-se ao facto de, apesar de já terem sido desenvolvidos trabalhos deste tipo noutros locais do Mundo e mais especificamente na Península Ibérica (PI), não existir para a região de Lisboa, segundo a bibliografia consultada, nenhum estudo com estas características. Assim, o trabalho desenvolvido nesta tese poderá tornar-se uma ferramenta importante para a persecução de medidas de controlo e gestão da qualidade do ar que sem o conhecimento da situação meteorológica subjacente será impossível estabelecer.

A tomada de consciência de que a capacidade da atmosfera em remover poluentes é limitada e de que estes prejudicam a qualidade de vida originou no século passado a criação de uma série de medidas de controlo de poluição e gestão da poluição atmosférica. Criou-se legislação mais rígida, assistiu-se a alterações nas tecnologias, tanto de produção, como de controlo ou de redução da poluição, mas fundamentalmente, limitaram-se as emissões de poluentes nas fontes.

O grau de dispersão dos poluentes na atmosfera depende principalmente das características das fontes de emissão, da natureza, concentração e transformações físico-químicas dos poluentes, da topografia do local e das condições meteorológicas.

Nas últimas décadas a matéria particulada na atmosfera (partículas inaláveis - PM_{10} e respiráveis - $PM_{2.5}$) tem tido um destaque especial devido aos seus efeitos na saúde humana e no clima.

A poluição por partículas é especialmente problemática em áreas urbanas com fraca ventilação, condições geográficas e meteorológicas desfavoráveis, e, um elevado número de fontes de emissão de que é exemplo a Cidade do México. Los Angeles, São Paulo, Santiago do Chile e Atenas também apresentam condições geográficas desfavoráveis à dispersão e emissões elevadas de partículas, associadas predominantemente ao tráfego automóvel. Em São Paulo também é relevante a contribuição das partículas provenientes da ressuspensão do solo (Castanho e Artaxo, 2001) e em Atenas da actividade industrial (Kallos *et al* 1993). As médias diárias de PM_{10} e $PM_{2.5}$ (2000-2002) apontam para concentrações similares em Los

Angeles e São Paulo, mas mais baixas do que as registadas em Santiago do Chile (Vega *et al*, 2004).

Em Portugal foram efectuados estudos relacionando a composição e origem das partículas (Pio *in* Almeida, 2004, Nunes *in* Almeida, 2004; Almeida, 2004) com os efeitos na saúde (Tente, 2005 e Castro *in* Tente, 2005). Barros e Borrego (2003) desenvolveram investigação incluindo uma abordagem meteorológica, embora relacionado com o ozono. Em Espanha trabalhos similares foram igualmente desenvolvidos (Millan *in* González, 2002; Baldasano *in* González, 2002; Soriano *in* González, 2002; Gangoi *in* González, 2002) e também no que se refere às partículas (Rodriguez *et al*, 2001; Artiñano *et al*, 2001; Rodriguez *et al*, 2002; Martin *in* González, 2002; González, 2002).

Relativamente ao transporte de partículas do Norte de África refiram-se estudos como os de Prospero e Carlson, 1972, Dulac *et al*, 1992, Carlson e Prospero, 1972, Reiff *et al*, 1986, Dayan *et al*, 1991, Savoie *et al*, 1989, Bergametti *et al*, 1989.

Estudos sobre a relação entre algumas variáveis meteorológicas (direcção e velocidade do vento, temperatura e humidade relativa do ar) e as concentrações de partículas foram efectuados em diversos locais do Mundo: Atenas (Kassomenos *et al* 2003; Katsoulis, 1996; Chaloulaku *et al* 2003); Taiwan (Yang, 2002; Wang *et al*, 1997); Hanoi (Hien e Bac, 2002); Nova York (Gaetano e Doherty, 2004); Buenos Aires (Bogo *et al*, 2003).

A informação meteorológica sinóptica tem vindo a ser utilizada em investigação na área da qualidade do ar, substituindo nalguns casos específicos a análise exaustiva de diversos parâmetros meteorológicos. No passado foram utilizados sistemas de classificação sinóptica subjectiva em estudos de qualidade do ar (especialmente ligados ao ozono) em algumas cidades do Mundo (exemplo: Atenas, Hong Kong, São Paulo). Mais recentemente foram elaborados alguns trabalhos que usaram classificações sinópticas objectivas, nomeadamente em Atenas (Kassomenos *et al*, 2003) e Edimburgo (Buchanan *et al*, 2002).

Segundo a bibliografia consultada, a utilização de uma metodologia estatística designada por análise de clusters começou a ser utilizada nos anos 80, em estudos

de climatologia sinóptica (Kalkstein *et al*, 1987) e em estudos de trajectórias de poluentes (Moody *in* Jorba *et al*, 2004; Cape *in* Jorba *et al*, 2004; Dorling *in* Jorba *et al*, 2004; Ávila e Alarcon *in* Jorba *et al*, 2004). Na Península Ibérica foram efectuados estudos de caracterização do tipo de tempo e de situações sinópticas típicas que afectam esta região (Martin *in* Jorba *et al*, 2004; Albentosa *in* Jorba *et al*, 2004; Sánchez *in* Jorba *et al*, 2004; Clavero *in* Jorba *et al*, 2004; Capel-Molina *in* Jorba *et al*, 2004).

Relativamente a estudos considerando uma abordagem sinóptica, Kassomenos *et al*, 2003, concluíram que a persistência de um determinado tipo de situação sinóptica tem um papel crucial na formação de um episódio de poluição. Diversos estudos relacionaram a ocorrência de episódios de partículas a anticiclones à superfície: Frioud *et al*, 2003, concluíram que a persistência de um anticiclone (8 dias) originou uma estratificação elevada de aerossóis no Vale do Reno; Kukkonen *et al*, 2005, verificaram que em quatro cidades da Europa onde ocorreram episódios por concentração de PM₁₀ prevalecia um anticiclone à superfície; Katsoulis, 1996, concluiu que um anticiclone à superfície e/ou uma crista aos 500 hPa criam condições atmosféricas para a acumulação de poluentes.

O transporte de longa distância de poluição do ar foi reconhecido na Europa e nos Estados Unidos já nos anos 70 (Wolff, 1977).

Mais recentemente, Cuevas *in* Viana *et al*, 2002, Bustos *in* Viana *et al*, 2002, Rodriguez *in* Viana *et al*, 2002, Torres *in* Viana *et al*, 2002, estudaram os cenários meteorológicos que favoreciam o transporte de partículas do Norte de África para as Canárias. Gonzalez (2002) concluiu que a região do Mediterrâneo Ocidental é afectada por uma média de 10 eventos por ano, com uma duração média de três dias. Em Portugal estes eventos também foram reportados em diversos estudos (Reis *in* Tente 2005; Fialho *in* Tente 2005 e Almeida, 2004).

Gangoiti *et al*, 2002 e Viana *et al*, 2003, utilizaram modelos de trajectórias em estudos efectuados no País Basco para identificar as fontes de episódios de ozono e partículas, respectivamente.

Um estudo efectuado no leste de Espanha concluiu que as concentrações mais elevadas de partículas estavam associadas a poeiras do Norte de Africa e as

segundas mais elevadas a partículas secundárias associadas a episódios regionais de ozono (Rodriguez *et al*, 2002).

Foram identificados padrões sazonais de partículas na Coruña (Querol *in* Iglesias *et al*, 2005; Iglesias *et al*, 2005), em Birmingham e em Atenas (Vardoulakis e Kassomenos, 2005).

Dayan e Rodnizk, 1999, analisaram a variação da altura da camada de mistura em Israel com as estações do ano e com as situações sinópticas.

Já foram utilizados vários modelos de mesoscala não hidrostáticos em vários países europeus em estudos de dispersão de poluentes, nomeadamente o ALADIN, MM5 e o RAMS; no entanto, ainda não foram suficientemente avaliados em termos de previsão da qualidade do ar e ainda apresentam muitas limitações nomeadamente no campo dos fluxos turbulentos (Sokhi e Baklanov, 2005).

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 *Matéria particulada na atmosfera*

2.1.1 Identificação

De um modo simplificado, a matéria particulada (PM) é uma mistura complexa de partículas que apresentam propriedades físicas e químicas diferentes nomeadamente o tamanho, densidade, forma e composição.

O termo aerossol é muitas vezes usado como sinónimo de partículas atmosféricas. No entanto a definição correcta inclui a fase gasosa que as envolve, ou seja, são partículas sólidas ou líquidas suspensas no meio gasoso (Wilson e Suh, 1997). Neste estudo utilizar-se-á o termo matéria particulada ou aerossol de um modo indiferenciado. A neblina e nevoeiro não estão normalmente incluídos como aerossóis, embora em termos práticos, sejam partículas líquidas suspensas no ar pela condensação do estado gasoso e cujos tamanhos podem variar entre 10-50 μm e 2-60 μm , respectivamente. O *spray* marinho é uma fonte de aerossóis líquidos. A poeira e o fumo são exemplos de partículas sólidas suspensas no meio gasoso, em que a poeira é oriunda da desagregação mecânica, cujo tamanho pode variar entre 0.1 e 10 μm , e o fumo de uma combustão incompleta, com tamanho inferior a 1 μm . O smog é uma mistura de partículas sólidas (fumo) e líquidas (nevoeiro) cujo tamanho está compreendido entre 0.01 e 2 μm e a bruma uma mistura de neblina e pó cujas partículas têm um diâmetro entre 0.38 e 0.76 μm (Umbría *et al.*, 1999).

2.1.2 Propriedades físicas e químicas

As partículas podem ser classificadas como primárias ou secundárias de acordo com o seu mecanismo de formação. As primárias são emitidas directamente para a atmosfera ou são formadas pela rápida condensação das moléculas dos gases, na ausência de reacções químicas, e as secundárias são produzidas nos processos de conversão gás-partícula, após reacções químicas de compostos gasosos (precursores) (Seinfeld e Pandis, 1998). Nas primárias incluem-se as emitidas por processos mecânicos (exemplo: solo, sal marinho) e de combustão (directamente - indústrias, veículos a motor, incêndios - ou derivadas da condensação dos vapores produzidos nesses mesmos processos e que são constituídas por carbono elementar, vários compostos orgânicos e inorgânicos e compostos metálicos). As partículas secundárias são formadas por reacções químicas na atmosfera, sob determinadas condições atmosféricas (nomeadamente radiação solar e humidade relativa), e podem envolver o oxigénio molecular (O_2), o vapor de água (H_2O), e espécies reactivas como o ozono (O_3), radicais (hidróxilo e nitrato), dióxido de enxofre (SO_2), compostos reduzidos de enxofre (exemplo: H_2S , DMS, CS_2), óxidos de azoto (NO_x), amónia (NH_3), e compostos orgânicos voláteis (COV). Estas reacções podem originar sulfatos, nitratos, sais de amónia e compostos orgânicos de carbono (Seinfeld e Pandis, 1998; Spengler e Wilson, 1996).

As partículas também são classificadas de acordo com a sua origem em naturais e antropogénicas. Incluem-se nas partículas naturais, as minerais provenientes do solo, cuja composição química e mineralógica depende do tipo de solo em questão (geologia da região) (Gillete *et al.*, 1972). São emitidas para a atmosfera pela acção do vento (predominantemente de superfícies áridas) e por vezes transportadas para longas distâncias dessas mesmas superfícies. Ainda se incluem nesta classe as partículas provenientes das emissões vulcânicas, o *spray* marinho resultante da acção do vento ou da chuva na superfície do mar e dos oceanos ou pelo rebentar das ondas na linha de costa, as partículas provenientes da decomposição de plantas e animais e de resíduos biológicos, como o pólen, bactérias, vírus e ainda partículas de outras fontes conforme se pode visualizar na Tabela 1.

As principais fontes de emissão de partículas antropogénicas e dos gases precursores estão localizadas em áreas urbanas e industriais. As partículas nas

zonas urbanas são maioritariamente da responsabilidade do tráfego rodoviário geradas mecanicamente, pelo levantamento das poeiras existentes no pavimento, pelo desgaste dos travões e pneus ou como resultado das emissões pelo tubo de escape. Relativamente ao sector industrial, são as cimenteiras, as centrais térmicas, cerâmicas, unidades de fundição e a indústria da construção as principais fontes de emissão de partículas para a atmosfera. Os incêndios florestais são também responsáveis pela emissão antropogénica de partículas.

Tabela 1 – Constituição química e fontes de partículas finas e grosseiras
(adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998 e Tente, 2005)

	Partículas grosseiras ($>2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)		Partículas finas ($<2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Naturais	Antropogénicas	Naturais	Antropogénicas
Fontes	<ul style="list-style-type: none"> - Solos (erosão, ressuspensão e transporte de regiões áridas) - Vulcões - Spray marinho - Fontes biológicas (polens, decomposição de plantas e animais) - Incêndios florestais 	<ul style="list-style-type: none"> - Solos (ressuspensão do pavimento por tráfego) - Actividades industriais (cimento, cerâmica, construção, entre outras) - Combustão (petróleo e carvão) 	<ul style="list-style-type: none"> - Oxidação de gases sulfurosos - Oxidação dos óxidos de azoto (provenientes de transpiração do solo e de relâmpagos) - Produtos de transformação de compostos orgânicos de espécies biogénicas (p.ex. terpenos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Actividades industriais com altas temperaturas (exemplo: fundições) - Emissões de tráfego rodoviário
Componentes químicos principais	<ul style="list-style-type: none"> - Óxidos metálicos de elementos da crosta terrestre (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 e TiO_2) - CaCO_3, Na_2SO_4, MgSO_4 e K_2SO_4 - Cloreto de sódio (NaCl) - Sulfato (SO_4^{2-}) - Nitrato (NO_3^-) - Sais de amónia - Polens, Bactérias, Vírus e Microorganismos - Carbono orgânico e inorgânico - Elementos da abrasão dos pneus 		<ul style="list-style-type: none"> - Sulfato (SO_4^{2-}) - Nitrato (NO_3^-) - Amónia (NH_4^+) - Hidrogenião (H^+) - Carbono Elementar - Metais (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn e Fe) 	

As partículas primárias tanto podem ser grosseiras como finas, enquanto as secundárias são predominantemente finas (ver Tabela 1). Como se observa as partículas resultantes de fontes naturais e antropogénicas podem ser quer finas quer grosseiras. As partículas resultantes da crosta terrestre são predominantemente superiores a $1\mu\text{m}$, e destas as provenientes dos desertos têm uma composição química semelhante à composição do material crustal (Avila *et al.*, 1997), com valores bastante elevados de Alumínio, Ferro, Silício (Tente, 2005).

As características físicas e químicas dos aerossóis estão fortemente dependentes do tipo de mecanismo de formação e da sua origem, que por sua vez tem implicações no seu tamanho. De facto, o tamanho das partículas é o parâmetro mais importante para descrever o seu comportamento, dado que a sua origem, composição química, propriedades ópticas, mecanismos de remoção, e o tempo de residência na atmosfera estão relacionados com o seu tamanho (Spengler e Wilson, 1996). O tamanho das partículas é definido pelo seu diâmetro assumindo que estas têm uma forma esférica, apesar de na prática a sua forma geométrica ser variada. As partículas que se aproximam das esféricas são as que contêm água. Deste modo, foi introduzido o diâmetro equivalente para representar a forma irregular das partículas. Diferentes diâmetros equivalentes são usados: no caso das pequenas partículas em que o processo de difusão é o dominante, normalmente é usado o diâmetro de *Stokes*, enquanto que para as partículas grosseiras em que predomina a gravitação é usado o diâmetro aerodinâmico (EPAb), 2003). De qualquer forma é possível estabelecer-se uma relação deste diâmetro com o aerodinâmico, sendo este normalmente o utilizado no campo operacional (ao longo deste texto o diâmetro referido é o aerodinâmico). O tamanho das partículas varia de dezenas de nanómetros (nm) a dezenas de micrómetros (μm). A enorme gama do tamanho das partículas de aerossóis dificulta a representação da distribuição de todos os tamanhos (Seinfeld e Pandis, 1998). Uma forma de caracterizar a distribuição do tamanho dos aerossóis é a representação multimodal, baseada nos tamanhos observados e nos processos de formação das partículas. O número de modos da distribuição, identificado com o número de picos, bem como a sua forma depende do tipo de aerossóis.

A classificação modal foi proposta pela primeira vez por Whitby, (EPAb), 2003). A função da distribuição granulométrica das partículas poderá ser descrita em número, em superfície, em volume e em massa. A distribuição em número de partículas - $n_N(D_p)$ - representa a probabilidade de uma selecção aleatória de partículas ter um diâmetro na gama D_p e D_p+dD_p , em que D_p é o diâmetro físico ou de *Stokes*. Na atmosfera a maior parte das partículas apresenta um diâmetro inferior a $0.1 \mu\text{m}$ e a função da distribuição pelo número apresenta um pico próximo da origem (Figura 1). Considera-se $n_S(D_p)$ e $n_V(D_p)$ a distribuição dos aerossóis por superfície e por

volume, respectivamente, a superfície total e o volume total de aerossóis correspondente à área abaixo das respectivas curvas.

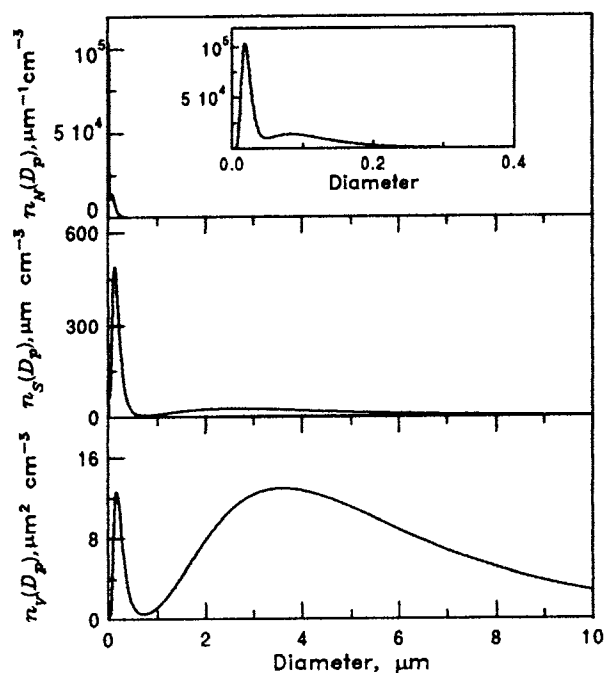


Figura 1 - Distribuição contínua dos aerossóis atmosféricos em número, em superfície e em volume *versus* tamanho das partículas. A distribuição em número da gama de partículas 0-0.5 μm encontra-se destacada na figura do interior (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998)

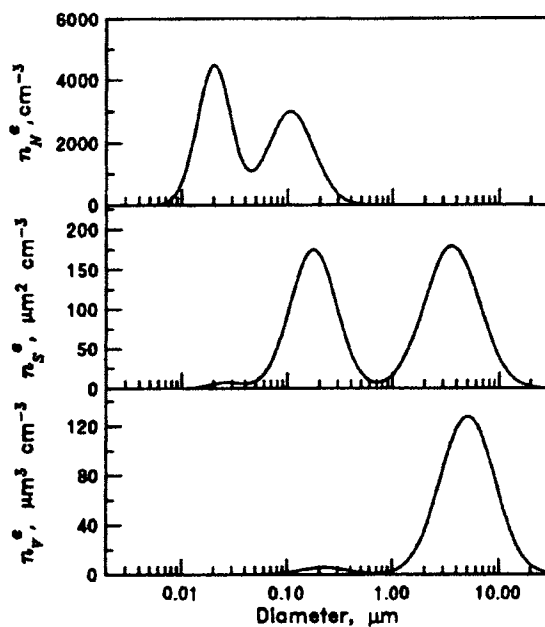


Figura 2 - Distribuição do tamanho das partículas expressa em função logarítmica (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998)

A distribuição da massa da partícula, no que se refere ao seu tamanho, é expressa através da seguinte equação

$$n_M(Dp) = n_v(Dp) \times \left(\frac{\rho_p}{10^6} \right) \quad (1)$$

Devido ao facto das partículas cobrirem uma enorme gama de tamanhos, conforme referido atrás, a distribuição destes é muitas vezes expressa em termos do logaritmo do diâmetro da partícula. De facto, aplicando a função logarítmica é possível visualizar melhor a distribuição das partículas sobretudo a referente às partículas inferiores a $0.3 \mu\text{m}$ (Figura 2). Consta-se assim que a sua distribuição se comporta como uma distribuição normal.

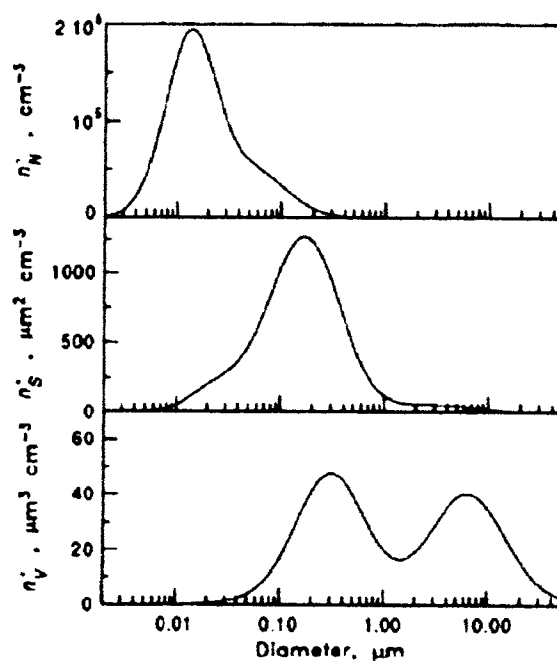


Figura 3 – Distribuição típica do número, superfície e volume do aerossol urbano (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998)

Numa atmosfera urbana, os aerossóis são emitidos predominantemente pelos transportes, indústrias, fontes naturais ou são secundários formados pela conversão gás-partícula. Para uma atmosfera urbana típica, a distribuição do número de partículas, na escala linear é dominada por partículas inferiores a $0.1 \mu\text{m}$. A maioria apresenta uma área de superfície na gama 0.1 a $0.5 \mu\text{m}$ e a maior fracção do volume de partículas e portanto a maior massa é encontrada para partículas cujo diâmetro é

superior a $0.1 \mu\text{m}$ (apresentando dois modos distintos um abaixo de 1 e outro acima de $1 \mu\text{m}$) (Seinfeld e Pandis, 1998) (Figura 3).

A distribuição dos aerossóis numa zona urbana apresenta uma variação que depende por exemplo do grau de urbanização e da distância à fonte de emissão (Whitby in Seinfeld e Pandis, 1998). Na Figura 4 estão representadas curvas de distribuição em número consoante o tipo de ambiente envolvente.

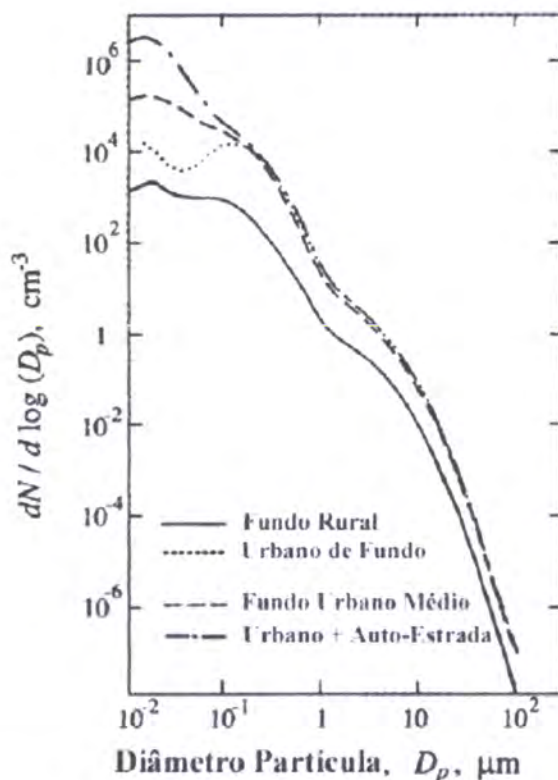


Figura 4 – Distribuição em número para diferentes ambientes (próximo de uma auto-estrada, urbano médio, urbano de fundo e de fundo não urbano) (adaptado de Tente, 2005 e Seinfeld e Pandis, 1998)

Identifica-se uma maior concentração de partículas da gama fina (inferior a $0.1 \mu\text{m}$), em zonas de tráfego intenso (exemplo: próxima de uma auto-estrada) relativamente a zonas “médias” urbanas. Numa zona urbana próxima de uma fonte de emissão como uma auto-estrada é possível identificar-se três modos (Figura 5) no que se refere à distribuição da massa das partículas, e é essa distribuição trimodal que é comumente utilizada para representar o centro de uma zona urbana (Figura 6), cujos picos médios variam consoante as características da região (CONCAWE, 1999).

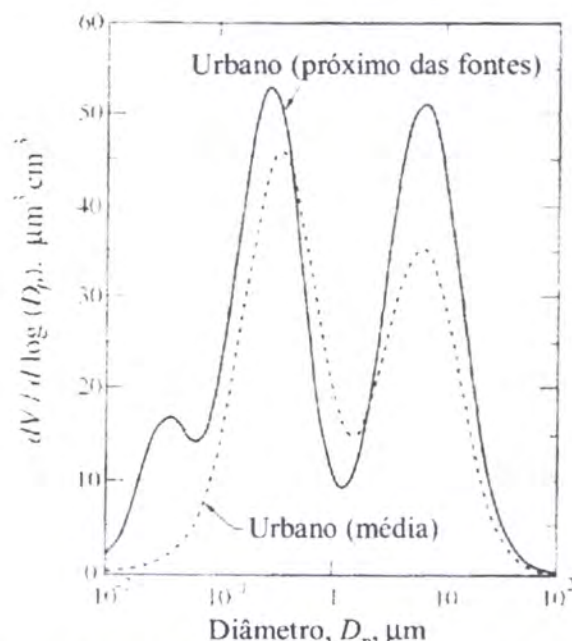


Figura 5 – Distribuição do tamanho dos aerossóis, em volume, próximo de uma fonte de emissão (auto-estrada) e em condições médias urbanas (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998)

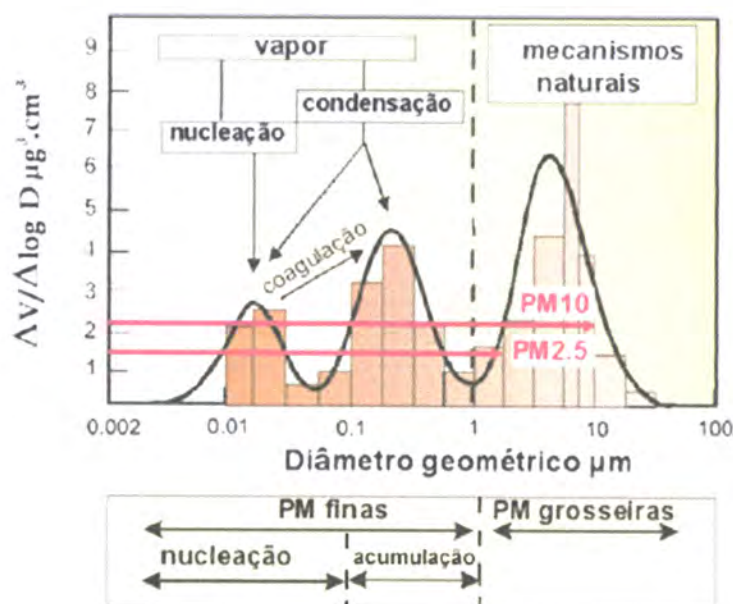


Figura 6 – Distribuição do tamanho em volume, medido no tráfego, mostrando as partículas finas e grosseiras e os modos de nucleação e de acumulação das partículas finas. Identificam-se também os mecanismos de transformação e de crescimento das partículas (nucleação, condensação e coagulação) (fonte: Wilson e Suh (1997); adaptado de Tente, 2005, Seinfeld e Pandis, 1998 e EPA, 2003)

Numa atmosfera marinha, em que a gama do tamanho das partículas pode variar de 0.001 a 100 µm (Benito, 2001) a sua distribuição também é trimodal.

Os três modos apresentados na Figura 6 representam:

- o modo de nucleação para as partículas ultra-finas cujo diâmetro se situa abaixo dos $0.1\ \mu\text{m}$, formadas por nucleação e também por condensação e coagulação (Raes *et al.*, 2000);
- o modo de acumulação para partículas que apresentam um diâmetro entre $0.1\ \mu\text{m}$ e o correspondente ao mínimo da distribuição em massa ou em volume que varia normalmente entre 1 a $3\ \mu\text{m}$, formadas por condensação e coagulação;
- o modo grosseiro para as partículas com diâmetro superior ao mínimo da distribuição das partículas em massa ou em volume, formadas por processos mecânicos.

Os processos de formação e crescimento das partículas inferiores a $1\ \mu\text{m}$ não tendem a produzir partículas superiores a este diâmetro, e os processos mecânicos que formam partículas primárias não conseguem facilmente reduzir o tamanho das partículas para diâmetros inferiores a $1\ \mu\text{m}$. De facto, a transferência de partículas de diferentes modos do espectro do tamanho apresentam uma barreira próxima de $1\ \mu\text{m}$. O limite inferior do modo grosseiro está compreendido entre 1 e $3\ \mu\text{m}$ numa zona de sobreposição das partículas finas e grosseiras - região intermodal (Wilson e Suh, 1997). Esta região intermodal é facilmente visualizada na Figura 7.

O limite de separação entre o modo de acumulação e o grosseiro depende por exemplo da humidade relativa. Esta separação é normalmente próxima de $1\ \mu\text{m}$ em zonas secas com altas concentrações de partículas do modo grosseiro, e próxima de $2.5\ \mu\text{m}$ em climas húmidos (WHO, 2002), devido à existência de mais partículas higroscópicas ou de gotas. Em estudos epidemiológicos, as partículas são classificadas como finas ou grosseiras, em que as finas apresentam um diâmetro inferior a $2.5\ \mu\text{m}$ e as grosseiras um diâmetro superior a $2.5\ \mu\text{m}$. Deste modo pode-se considerar $\text{PM}_{2.5}$ apenas uma aproximação das partículas de modo fino.

As partículas grosseiras têm uma origem basicamente primária, excepto os nitratos cuja distribuição granulométrica varia entre 1 e $10\ \mu\text{m}$, enquanto que as finas são principalmente formadas por partículas secundárias (Almeida, 2004).

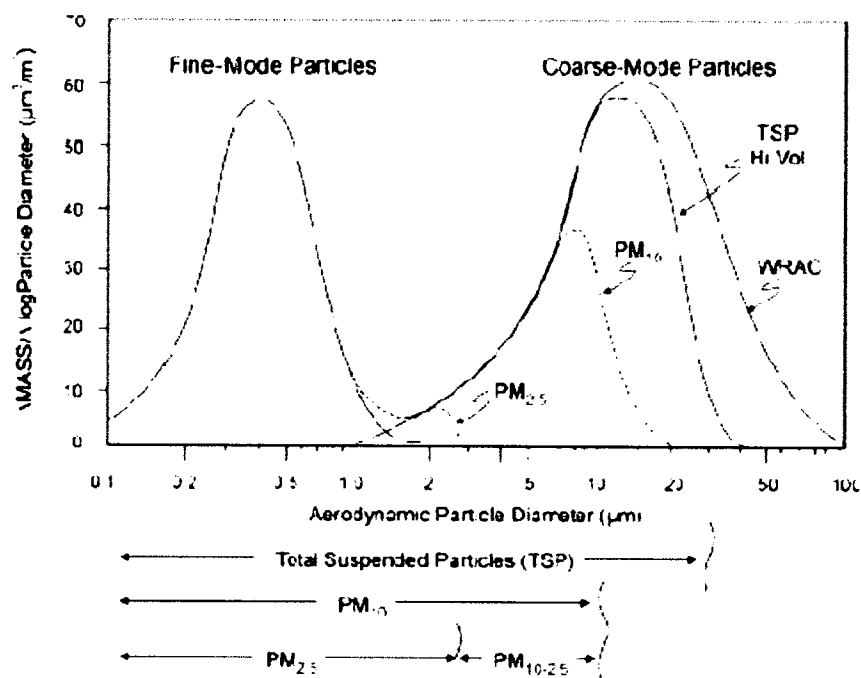


Figura 7 – Distribuição ideal da matéria particulada identificando o modo fino e grosseiro e as respectivas amostras por tipo de equipamento (adaptado de Wilson e Suh, 1997)

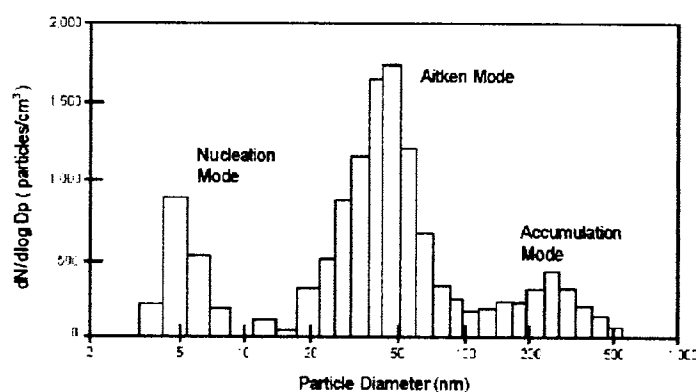


Figura 8 – Distribuição de tamanho em número observado na floresta boreal da Finlândia mostrando a estrutura trimodal das partículas finas. A concentração total do número de partículas foi 1011 partículas/ cm^3 (valor médio de 10 minutos) (fonte: adaptado da EPAb, 2003).

No modo de nucleação, a nucleação e a condensação são os principais mecanismos de formação das partículas. A sua contribuição para a massa total é desprezável devido ao seu pequeno tamanho, mas são de um modo geral as mais numerosas na atmosfera. Incluem-se nesta gama partículas de sulfato, de carbono elementar (cinzas), alguns metais e alguns compostos orgânicos. Há autores que classificam as partículas ultra-finas ou núcleos de *aitken* como as que possuem um diâmetro inferior

a 0.1 μm (Spengler e Wilson, 1996), e outros (mais actuais) que dividem as partículas inferiores a 0.1 μm , em partículas pertencentes ao modo de nucleação (inferiores a 0.02 μm) e em núcleos de *aitken* (pertencentes à gama 0.02 a 0.1 μm) - modo de *aitken* (EC, 2004). De facto, estes foram os novos modos introduzidos após Whitby e que correspondem à distribuição da gama das partículas ultra-finas, apresentada na Figura 8.

A distribuição dos picos na gama das partículas ultra-finas depende fundamentalmente da fonte de emissão, temperatura, pressão de vapor de saturação dos componentes e idade dos aerossóis. A distribuição dos modos de *aitken* e de nucleação é melhor representada em número, tal como a apresentada na Figura 8, observada numa floresta boreal da Finlândia, mas pode ser representada por volume, na proximidade de uma fonte de tráfego ou de outras fontes de partículas ultra-finas. A nucleação inclui a formação de partículas na atmosfera por reacções químicas seguida de coalescência em agregados ou a formação de partículas muito pequenas provenientes da condensação dos gases (nucleação homogénea), emitidos a altas temperaturas pelas fontes de emissão, quando entram em contacto com o ar ambiente mais frio. O modo de nucleação normalmente só é observado durante os eventos em que ocorre a nucleação. O modo de *aitken* acontece durante o crescimento de partículas mais pequenas (coagulação das partículas do modo de nucleação) ou por nucleação devido a altas concentrações de precursores. Os únicos gases precursores que formam partículas por nucleação homogénea são o ácido sulfúrico e a amónia (EC, 2004). A nucleação depende não só dos gases precursores como também das condições termodinâmicas existentes. A nucleação é favorecida pelo decréscimo de temperatura e/ou aumento da humidade relativa do ar (segundo experiências efectuadas por Easter e Peters (1994) numa atmosfera marinha, 1994). O processo de nucleação pode no entanto ser alterado por determinadas perturbações de pequena escala, como por exemplo, a turbulência ou movimentos de larga escala como os observados na camada limite planetária. Segundo Dye *in* EC, 2004, a existência da nebulosidade aumenta a conversão de dióxido de enxofre em sulfatos. Segundo Rodhe *in* EC (2004), cerca de 90 % do sulfato formado na atmosfera é originado na fase líquida por oxidação do dióxido de enxofre e ocorre nas nuvens. Charlson *in* Easter e Peters (1994), sugeriu que grande parte do sulfato (de origem não marinha) era produzido anualmente a partir de sulfureto de dimetilo

(DMS) no processo de formação das nuvens, e que segundo Jaenicke, 1998, constituía 50 % deste tipo de partículas.

A taxa de formação, aglomeração, coagulação e remoção das partículas combinada com o seu tamanho e solubilidade determina o tempo de residência dos aerossóis na atmosfera e pode segundo Jaenicke, ser descrito por uma simples formula (Pueschel, 1995). Na Figura 9 é possível visualizar o tempo de residência das partículas na atmosfera em função do tamanho.

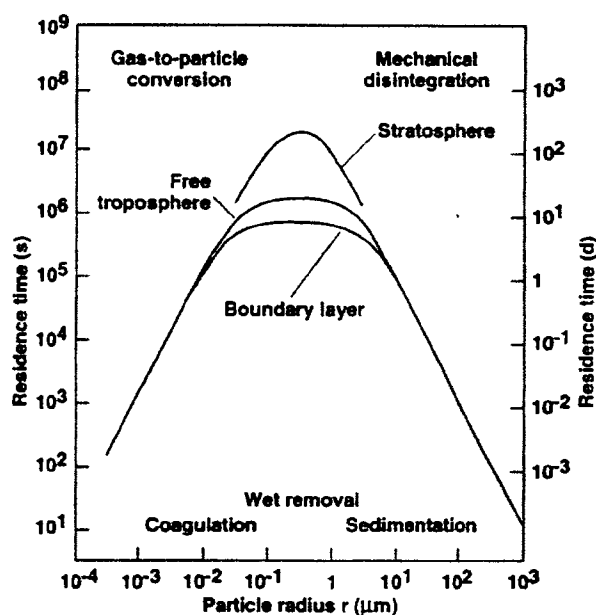


Figura 9 - Tempo de residência das partículas na atmosfera em função do seu tamanho (fonte: Jaenicke, adaptado de Pueschel, 1995)

As partículas na fase de nucleação têm um tempo de residência na atmosfera bastante curto, da ordem de horas, por sofrerem processos de coagulação com partículas mais grosseiras ou crescerem por condensação (Raes *et al.*, 2000). Parte pode também ser removida por deposição seca, sendo este processo proporcional à concentração dos aerossóis à superfície. A taxa de remoção é determinada pela velocidade de deposição, pelo coeficiente de difusão vertical turbulento da camada limite e pela distância vertical entre a superfície e a existência de aerossóis (Pueschel, 1995).

No modo de acumulação as partículas formam-se por coagulação das partículas ultra-finas (resultante da colisão das partículas) e por condensação de gases na superfície de partículas já existentes (nucleação heterogénea). A taxa de coagulação

depende do número de partículas e da velocidade de colisão e a taxa de condensação da área de superfície das partículas. Estes parâmetros decrescem rapidamente à medida que o diâmetro se aproxima de $1\mu\text{m}$. No entanto, as partículas *aitken* crescem até às partículas do modo de acumulação mais rapidamente através de reacções na fase líquida que ocorrem nas gotas das nuvens (EC, 2004), do que pelo processo de condensação e/ou nucleação/coagulação. Os maiores constituintes das partículas pertencentes a este modo em regiões industrializadas são: sulfato, nitrato, ião amónia, carbono elementar e carbono orgânico resultantes da conversão gás-partícula. Incluem-se também nesta gama uma variedade de metais-traço formados em processos de combustão e ainda material orgânico como os fungos, germes, bactérias ($<1\mu\text{m}$) e vírus ($<2\mu\text{m}$). Estas partículas apresentam o maior período de tempo de residência na atmosfera (justificando o nome de acumulação) porque são muito pequenas para se depositarem por acção da gravidade, e no entanto grandes para coagularem rapidamente em partículas maiores. O seu tempo de residência na atmosfera pode variar desde dias a semanas, ficando suspensas no ar, podendo ser transportadas a grandes distâncias (centenas a milhares de quilómetros).

Estas partículas são consideradas eficientes núcleos de condensação das nuvens porque são as mais solúveis e têm o diâmetro ideal. Portanto, a remoção da atmosfera está fundamentalmente associada ao processo de formação das nuvens e ocorre predominantemente por deposição húmida.

A efectividade de uma partícula como núcleo de condensação depende do seu tamanho, do seu comportamento com a água e da mistura de espécies em questão. Correctamente, as partículas são hidrófobas, possuindo no entanto componentes solúveis que lhes permitem ser activas a baixa sobressaturação até atingirem o seu raio crítico ou apresentam partes hidrófilas que lhes permitem tornarem-se activas nas nuvens a elevadas sobressaturações (IPCC, 2001). Junge *in* Warneck, 1987 identificou a sobressaturação necessária para a partícula crescer até ao raio crítico no pico da curva *Kohler*, altura em que a formação das gotas passa a ser exequível, demonstrando que a presença de material insolúvel não aniquila a capacidade para servir de núcleo de condensação.

Apesar de todas as partículas adquirirem um certo conteúdo de água com o aumento da humidade relativa, são as partículas com o raio superior a $0.1\mu\text{m}$ que se tomam

efectivamente activas e crescem até se tornarem gotas de nuvens. As partículas mais pequenas e portanto as mais numerosas tornam-se activas mais tarde quando o ar ascende até determinadas altitudes e a sobressaturação aumenta. Segundo Li *in* IPCC, 2001, quando a humidade é próxima de 100%, as partículas absorvem água e crescem conseguindo atingir diâmetros 5 vezes superiores ao seu tamanho, o que leva alguns autores a separar este modo de acumulação num modo de condensação e num modo higroscópico. A higroscopicidade dos aerossóis diminui quando as substâncias hidrófobas (orgânicas) estão misturadas com os sais hidrófilos como os sulfatos. Por outro lado, a presença dos sulfatos nas poeiras do deserto converte estas em efectivos núcleos de condensação. Os sulfatos e os sais marinhos (tal como o cloreto de sódio) são considerados os maiores potenciais núcleos de condensação. As partículas carbonatadas são dificilmente hidratadas e requerem uma oxidação antes de se hidratarem, no entanto a biomassa de aerossóis queimados parece funcionar como um eficiente núcleo de condensação (IPCC, 2001).

Normalmente num ambiente continental de aerossóis, as partículas de *aitken* contribuem pouco como núcleos de condensação, enquanto que num ambiente marinho são os núcleos *aitken* os maiores participantes (Warneck, 1987). As partículas *aitken* não activas são capturadas nas gotas das nuvens por coagulação térmica.

Sintetizando, as partículas finas incluem o modo de nucleação, *aitken* e de acumulação e representam uma gama desde o mínimo mensurável até ao mínimo observável na distribuição por massa ou volume e que abrange a gama entre 1 e 3 μm .

O modo grosseiro abrange a gama superior à incluída no modo de acumulação. Estas partículas são pequenas em número, mas incluem o maior volume de partículas, a maior massa. As partículas com diâmetro superior a 1 μm , mas sobretudo superior a 2.5 μm , são formadas por processos mecânicos oriundas do solo (erosão ou pela acção do vento (suspensão de poeiras)) e por evaporação da superfície do mar (sal marinho). Inclui-se ainda a suspensão de poeiras e de cinzas industriais, de material biológico como pólen, esporos, fragmentos de plantas ou de insectos. Estas partículas contêm principalmente elementos do solo e sais marinhos, como o silício, alumínio, cálcio, ferro, magnésio, estrôncio, sódio, potássio e sulfatos (González, 2002). Apesar destas partículas serem predominantemente primárias,

existem contudo secundárias, quando da interacção destas últimas com gases (condensação).

Estas partículas são removidas da baixa troposfera por precipitação ou predominantemente por sedimentação (deposição gravitacional). As partículas com diâmetro entre 0.1 e 10 μm (fracção classificada como matéria particulada em suspensão) apresentam uma velocidade de sedimentação muito baixa. A matéria considerada sedimentar é a que apresenta um diâmetro entre 10 e 50 μm (Umbría *et al*, 1999). Para partículas de diâmetro entre 1-20 μm , a velocidade de sedimentação é dada pela lei de Stokes e é definida pela competição entre duas forças que actuam nas partículas: a resistência do ar ao movimento da partícula e que é proporcional ao seu diâmetro e a força da gravidade que é proporcional à sua massa (Spengler e Wilson, 1996). Conclui-se assim, que as partículas pertencentes aos modos de nucleação e grosseiro predominam próximo das fontes de emissão. O tempo de residência na atmosfera aumenta com a altitude e depende de um determinado número de factores como a distribuição vertical do vapor de água que interfere nas reacções e processos de remoção (a ausência ou limitação da quantidade de vapor de água existente na estratosfera, sem a consequente formação de nuvens, torna a remoção pela precipitação ineficaz) e na distribuição vertical das espécies químicas (Spengler e Wilson, 1996). Segundo Gras *in* Seinfeld e Pandis (1998) a concentração diminui com a altitude de uma forma exponencial até uma determinada altitude, e a partir daí o perfil vertical torna-se constante (Figura 10).

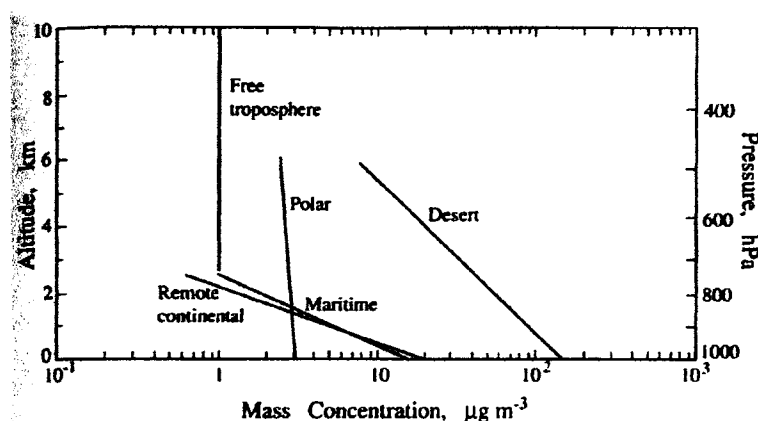


Figura 10 – Distribuição vertical da concentração de aerossóis (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998)

Na estratosfera, a concentração de partículas do modo *aitken* diminui com a altitude, enquanto a correspondente ao modo de acumulação aumenta, atingindo um pico próximo dos 20 km, devido à produção de ácido sulfúrico (*junge sulfate layer*) (Warneck, 1987).

As partículas grosseiras por sua vez decrescem rapidamente com a altitude devido à tendência para sedimentarem. Normalmente são removidas da atmosfera ao fim de umas horas e próximo da fonte de emissão, excepto as mais pequenas desta gama que percorrem grandes distâncias quando associadas a tempestades de areia.

As características radiativas das partículas variam com a humidade relativa do ar que as rodeia. Tal como atrás referido, as partículas hidrófilas típicas aumentam rapidamente de tamanho com o aumento da humidade relativa do ar, enquanto que as partículas minerais apresentam pouca variação. A um tamanho crescente corresponde um aumento dos coeficientes de difusão e de absorção, dependendo no entanto do comprimento de onda da radiação. De facto, a humidade relativa influencia principalmente as propriedades radiativas no intervalo do infravermelho (Benito, 2001).

As partículas que difundem mais eficientemente a radiação solar são as que têm dimensões próximo do comprimento de onda da radiação solar. Os aerossóis do modo de acumulação, com diâmetro médio entre 0.1 e 1 μm , são os mais importantes, em termos da interacção com a radiação. Estes aerossóis hidratam para diâmetros entre 0.1 e 2 μm atingindo o factor de eficiência de extinção mássico mais elevado. Os aerossóis pertencentes a este modo não só têm um elevado factor de eficiência de difusão, como têm o tempo de residência na atmosfera mais longo. Os aerossóis do modo grosseiro apresentam o albedo de difusão simples mais baixo, mesmo que a sua constituição (índice de refacção) seja idêntica à dos aerossóis pertencentes ao modo de acumulação. A absorção é dominada por partículas que contêm carbono elementar (cinzas).

As propriedades radiativas dependem da composição química dos aerossóis. E como os aerossóis podem ser compostos apenas por uma espécie química ou, o que acontece mais frequentemente, por uma mistura de espécies químicas o tipo de mistura (por exemplo: interna ou externa) vai determinar a evolução possível das partículas e consequentemente as suas propriedades radiativas. As espécies

combinadas podem produzir diferentes distribuições de tamanhos de aerossóis, com propriedades ópticas e tempos de vida na atmosfera diferentes dos seus componentes. A composição química dos aerossóis é contabilizada no âmbito da radiação em termos de índice de refração (n),

$$n = n_r - in_i \quad (2)$$

em que n_i é a parte imaginária e directamente proporcional ao coeficiente de absorção da substância em questão.

As características radiativas dos aerossóis foram descritas pela teoria de Mie e caracterizadas por um índice de refração admitindo as partículas como esféricas e isotrópicas.

As características radiativas das partículas esféricas de raio r e índice de refração n , a um determinado comprimento de onda, vêm directamente da teoria de Mie e são a secção eficaz de difusão σ_{scatt} , a secção eficaz de absorção σ_{abs} e por último a secção eficaz de extinção σ_{ext} que representa a soma das duas anteriores e não é mais do que a quantidade de energia radiante removida da energia radiante incidente por moléculas ou partículas. Os factores de eficiência de difusão e de extinção são definidos pela razão entre as respectivas secções e a secção geométrica. Por último, o albedo de difusão simples ω representa a fracção da radiação perdida por extinção que é difundida para fora do feixe de radiação $\omega = \sigma_{\text{scatt}} / \sigma_{\text{ext}}$.

2.1.3 Distribuição espacial e temporal da matéria particulada à superfície

Dada a complexidade das partículas é de esperar que exista uma variação espacial de concentrações e de composição a nível Europeu, controlada pelas próprias variações regionais, tais como: emissões de partículas naturais e antropogénicas, condições ambientais locais (concentrações de gases reactivos, humidade, temperatura, radiação, tipo de solo) e dinâmica atmosférica regional (González, 2002).

Hoek *in* González (2002) concluiu que as concentrações de PM_{10} em áreas urbanas e industriais crescem gradualmente do norte para o sul da Europa. Estudos efectuados

por Millán *in* González (2002) mostraram que os altos níveis de concentração de ozono à superfície na parte leste de Espanha são favorecidos pela meteorologia regional, e que essas altas concentrações exercem influência na formação de partículas secundárias devido à presença de gases reactivos (González, 2002). Querol *in* González (2002) adianta que um maior índice de insolação na Europa do Sul contribui para uma maior relevância na formação das partículas secundárias mediante processos fotoquímicos relativamente à Europa do Norte.

A maior fonte de poeiras existe nas áreas desertas do Hemisfério Norte. A influência das emissões de partículas naturais nas concentrações de PM_{10} em ambientes de fundo é especialmente importante na Europa do Sul. As poeiras minerais naturais podem ser originadas pela ressuspensão local dos solos (cobertura vegetal mais pobre nos Países Mediterrâneos) ou transportadas de regiões áridas mais ou menos longínquas. O levantamento de poeiras do solo depende da rugosidade da superfície, da granulometria e do conteúdo em humidade do solo, além da velocidade do vento. A actividade humana provoca também distúrbios que mobilizam fortemente as poeiras. Segundo Prospero *in* González (2002), o transporte das poeiras do Saara para Barbados aumenta em anos de “El Niño” e segundo Moulin *in* IPCC (2001) a poeira transportada para o Atlântico Norte e para o Mediterrâneo está correlacionada com a Oscilação do Atlântico Norte (Moulin *in* IPCC, 2001). Apesar das partículas oriundas da crosta terrestre terem teoricamente um tamanho maior que $2.5\ \mu m$, uma proporção considerável de $PM_{2.5}$ está presente no ar ambiente na Europa durante episódios de poluição associados ao transporte de poeiras do deserto (EC, 2004). Medições efectuadas nos desertos identificaram partículas da gama maior que $0.6\ \mu m$ (Gille, 1972; D’Almeida e Schutz, 1983). Outros estudos detectaram partículas mais pequenas ($0.01\ \mu m$ de raio) da distribuição por número, em que o máximo está abaixo de $0.1\ \mu m$ (D’Almeida e Schutz, 1983). Pensa-se que este tamanho tão pequeno está associado à dissolução de minerais (Jaenicke, 1998).

As poeiras transportadas do Norte de África, dos desertos do Saara e do Sahel, afectam a Europa do Sul, sobretudo a bacia do Mediterrâneo. No Inverno e Primavera a poeira do Norte de África é predominantemente produzida no Sahel ou na região Sub-Saariana entre $10^{\circ}N$ e $20^{\circ}N$. No Verão a maior contribuição é da região do Saara entre $15^{\circ}N$ e $25^{\circ}N$. Este deslocamento para norte no Verão está associado ao deslocamento da zona de convergência intertropical (González, 2002). Segundo EC,

2004, apesar do transporte de poeiras de África para a Europa se verificar todo o ano, estas ocorrem com menor frequência em Novembro e Dezembro. Os eventos mais intensos na Europa ocorrem em Fevereiro e Março oriundos do Deserto de Sahel atravessando o Atlântico. O desenvolvimento de uma depressão de origem térmica na Península Ibérica ou no Norte de África associado à localização de um anticiclone no Mediterrâneo Ocidental favorece o transporte de poeiras para a parte leste de Espanha (Artiñano *et al.*, 2001). Nas Ilhas Canárias verificam-se 5 a 15 episódios por ano, com uma duração de 2 a 22 dias. No Sul da Península Ibérica o número de episódios oscila entre os 16 e 19 por ano e dura entre 1 a 10 dias. As poeiras do Norte de África devido a processos de ressuspensão são injectadas na atmosfera e transportadas a diferentes altitudes (desde o nível do mar até 4500 m) para o Mediterrâneo (Loÿe-Pilot *et al.*, 1986; Avila *et al.*, 1997; Bergametti *et al.*, 1992), Sul da Europa (Artiñano *et al.*, 2001; Reiff *et al.*, 1986) ou para a América do Sul e do Norte (Bergametti *et al.*, 1989; Prospero in Rodriguez *et al.*, 2001). As ilhas das Canárias (Prospero e Carlson, 1972; Bergametti *et al.*, 1989; Viana *et al.*, 2002), de Cabo Verde (Chiapello e Caquineau in González, 2002) e das Caraíbas (Carlson e Prospero, 1972) são também fustigadas por estes eventos.

Em áreas costeiras da Europa a contribuição marinha para a concentração de PM_{10} pode ser importante (fracção $> 2.5 \mu m$). A ocorrência de ventos do Atlântico favorece a dispersão e diluição da matéria particulada, por um lado, mas pode aumentar a componente de PM referente ao *spray* marinho, por outro (Almeida, 2004).

Em ambientes considerados poluídos ($> 50 \mu m$) as partículas de sulfato, nitrato e matéria orgânica são os principais contribuintes para as concentrações de PM_{10} e $PM_{2.5}$ na Europa. Nesses ambientes (poluídos) as concentrações de PM_{10} e $PM_{2.5}$ são segundo o relatório EC (2004), maiores no Inverno.

Segundo dados recentes da Comissão Europeia (EC, 2004) os níveis de concentrações de PM_{10} em áreas urbanas tendem a ser mais altos na Europa Central, de Sul e de Leste e mais baixos nos Países Nórdicos. As concentrações tendem a ser 40 % mais elevadas em estações próximas de fontes de tráfego intenso ou industriais do que em estações urbanas de fundo. A distribuição espacial de níveis de $PM_{2.5}$ ainda não é bem conhecida; no entanto as concentrações tendem a ser baixas nos Países da Escandinávia. As concentrações de PM_{10} decresceram entre 15 a 20 % entre 1997-2001, mas houve um aumento entre 2002 e 2003 em diversos países

que alegaram que essas concentrações se verificaram devido às condições meteorológicas. As emissões primárias de PM_{10} reduziram cerca de 18 % entre 1990 e 2000. A tendência de redução das PM_{10} na última década deve-se em parte à redução das emissões dos precursores das partículas secundárias. Por falta de dados não é conhecida nenhuma tendência nas séries de $PM_{2.5}$ (EC, 2004).

2.2 *Enquadramento Legislativo*

As partículas constituem cerca de 10-15 % da massa total de poluentes na atmosfera (Umbría *et al*, 1999). A sua concentração exprime-se como a massa total de partículas por um dado volume de gás ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

No passado, a matéria particulada era caracterizada pelas partículas totais em suspensão (PTS), cujo tamanho nominal variava entre os 25 e os 45 μm , ou por fumos negros e incluía tanto as partículas de origem natural como antropogénica. Actualmente este parâmetro caiu em desuso, especialmente pela sua pequena relevância em termos de efeitos na saúde. Normalmente a matéria particulada que é caracterizada nas estações de monitorização corresponde às fracções $PM_{2.5}$ e PM_{10} referentes às partículas cujo diâmetro é inferior a 2,5 e 10 μm , respectivamente. Hoje em dia sabe-se que a fracção $PM_{2.5}$ é a maior responsável pelos efeitos adversos na saúde e a que está mais associada à actividade humana e industrial e portanto a mais fácil de ser controlada. A Agência de Protecção Ambiental (Environmental Protection Agency - EPA), de acordo com o programa Norte-americano *Clean Air Act*, propõe e promulga os valores padrão ambientais da qualidade do ar nacionais (*National Ambient Air Quality Standards*). Os primeiros valores padrão promulgados pela EPA para as PM, no ano de 1971, eram referentes às PTS. O valor padrão referente à média de 24 horas era de $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que não podia ser excedido mais do que uma vez no ano. Em 1987, a EPA reviu esses valores e estabeleceu valores padrão para as PM_{10} , fracção que foi considerada na altura como indicador das partículas inaláveis que tinham efeitos adversos para a saúde. O valor era de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para uma média de 24 horas, e não podia ser ultrapassado mais do que uma

vez no ano. Em 1997, ficou determinado que as partículas finas e as grosseiras deveriam ser consideradas separadamente, uma vez que a fracção das PM_{10} incluía também as finas. Neste contexto foram propostos valores padrão para $PM_{2.5}$ ($65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, baseado numa média de 3 anos do percentil 98 das concentrações de 24 horas) passando estas a ser um indicador das partículas finas.

Por outro lado, os valores padrão para as $PM_{2.5}$ eram justificados pela evidente relação entre as partículas finas e os efeitos adversos na saúde.

A Directiva nº 1999/30/CE, de 22 de Abril, relativa a valores-limite para o dióxido de enxofre (SO_2), dióxido de azoto (NO_2) e óxidos de azoto (NO_x), partículas em suspensão (PM_{10}) e chumbo (Pb) no ar ambiente, foi transposta para o direito português pelo Decreto-Lei n.º 111/2002, de 16 de Abril. O estabelecimento de valores-limite para as partículas tem por base a protecção da saúde humana e inclui um valor limite de curto prazo (diário) e outro de longo prazo (média anual). A Organização Mundial de Saúde (OMS) afirma ainda que o valor limite de longo prazo é mais importante que o de curto prazo, porque os riscos relativos associados ao valor limite anual são superiores aos riscos relativos associados à exposição de curta duração. Como não está estabelecido um limiar abaixo do qual os efeitos na saúde não se verificam os valores legislados serão meros indicadores relativos.

No final do ano de 2005 foi apresentada pela Comissão Europeia uma proposta de Directiva que integra diferentes tipos de valores limite para a fracção $PM_{2.5}$ (CE, 2005). Actualmente, os Estados Membros têm planos de acção para reduzir as PM_{10} para os valores limite, o que implica indirectamente uma redução também da fracção $PM_{2.5}$. Concomitantemente as medições de $PM_{2.5}$ são requeridas no Decreto-Lei e uma análise estatística anual referente a estas partículas finas tem que ser enviada à Comissão Europeia. Mais de mil estações pertencentes à rede europeia medem concentrações de PM_{10} em áreas remotas e urbanas, em áreas de fundo urbanas e próximas de *hot spots* (pontos de elevada concentração por estarem próximos de tráfego rodoviário e fontes industriais) (EC, 2004).

Os valores limite estabelecidos para a média diária e anual de concentração de PM_{10} de acordo com a Directiva 1999/30/CE, tornavam-se progressivamente mais apertados até 2010 (a cumprir em 2 etapas). Segundo o Decreto-Lei acima referido que transpõe esta Directiva, depois de 1 de Janeiro de 2010, os valores de PM_{10}

médios anuais não podem exceder $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o valor médio diário de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ não pode ser excedido mais de 7 vezes em cada ano. Estes objectivos estão porém em revisão e podem não vir a ser aplicados no quadro da revisão apresentada pela Comissão no final do ano de 2005 (CE, 2005). O valor de referência utilizado neste trabalho é o valor limite diário de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cuja data de cumprimento é o ano de 2005 e que não deve ser excedido mais de 35 vezes no ano.

2.3 *Caracterização climática de Portugal Continental*

O território de Portugal Continental, compreendido entre as latitudes de 37°N e 42°N , está situado na região de transição da zona dos anticlones subtropicais para a zona das depressões subpolares. Os factores que mais condicionam as condições climáticas em Portugal Continental são a latitude, a orografia, a influência do Oceano Atlântico e a continentalidade (Santo, 1997). O clima da região da Grande Lisboa é ainda influenciado pelo estuário do Rio Tejo e em termos de orografia pela Serra de Sintra (com cerca de 529 m) e por uma série de linhas de cumeadas (com altitudes que variam desde os 400 aos 800 m) que se prolongam até à Serra de Montejunto. (Alcoforado, 1987; Ferreira, 1965). A sul do Rio Tejo há ainda o complexo montanhoso da Arrábida.

Na análise das condições meteorológicas de um dado local é imprescindível o conhecimento das situações sinóticas de superfície e de altitude e o tipo de massas de ar associado a essas mesmas situações. As propriedades da massa de ar nesse local são as propriedades adquiridas pela massa de ar na região de origem e posteriormente adquiridas pela acção de todos os factores encontrados no seu trajecto, desde a origem até ao local de observação (Ferreira, 1954).

Devido à sua situação geográfica, as condições de tempo do nosso país são controladas pelo anticiclone dos Açores e perturbadas pelas depressões do Atlântico Norte, as quais se fazem sentir com maior frequência no Outono e na Primavera, devido ao anticiclone dos Açores estar centrado, nestas estações de transição, a sul do Arquipélago. No Verão devido ao deslocamento para norte do anticiclone dos

Açores, as depressões deslocam-se em latitudes mais elevadas, tomando-se mais acentuada a influência daquele anticiclone (Silva, 1951).

Nos meses de Dezembro e Janeiro observa-se com frequência o desenvolvimento de um anticiclone no Norte da Europa ou na Europa Central ou um anticiclone centrado a noroeste da Península Ibérica e que se estende em crista até à Europa Central. De Outubro a Março é frequente o aparecimento de um núcleo de altas pressões de pequena extensão na Península Ibérica, que origina um gradiente muito fraco (Ferreira, 1965).

Segundo Diniz (1951), as depressões ocorrem no nosso país com mais frequência na Primavera, as cavadas são mais frequentes em Março e Abril e a passagem de superfícies frontais ocorre predominantemente de Outubro a Maio (sendo mais frequentes em Lisboa no Outono e Inverno). No Inverno, quando predomina a advecção de massas de ar do Atlântico com a passagem de depressões ou frentes é favorecida a diluição dos poluentes, a renovação das massas de ar e a limpeza de poluentes (González, 2002).

De Maio a Setembro predomina um anticiclone localizado nos Açores. Neste período é frequente formar-se uma depressão de origem térmica no interior da Península Ibérica. No Verão, sob condições de gradiente fraco, o aquecimento da terra promove a circulação de brisas e o desenvolvimento de processos de mesoscala o que origina no caso de Lisboa a diluição dos poluentes.

2.4 *Impactes da matéria particulada*

2.4.1 Impactes na Saúde

Durante a década de 90, diversos estudos epidemiológicos estabeleceram uma relação entre as concentrações de PM_{10} no ar ambiente e o número de hospitalizações e mortes devidas a doenças respiratórias e cardiovasculares (Dockery *et al.*, 1993; Pope *et al.*, 1995; Dockery e Pope, 1996). A Organização Mundial de Saúde (WHO, 2003) concluiu que “as partículas atmosféricas, por si, são

consideradas responsáveis pelos efeitos na saúde observados em estudos epidemiológicos abrangentes, os quais relacionam as concentrações atmosféricas de partículas com a mortalidade e morbilidade”. A evidência de efeitos adversos das partículas em suspensão sobre a saúde humana tem sido encontrada quer para efeitos agudos (exposições de curto prazo), quer para efeitos crónicos (exposições de longo prazo) (WHO, 2002).

Considera-se como efeito adverso qualquer efeito que afecte a performance do organismo ou que contribua para a redução da sua capacidade de resposta (alteração da morfologia, fisiologia, crescimento ou que crie lesões).

As partículas ácidas parecem aumentar de uma forma sinérgica os efeitos dos gases. Segundo o relatório CONCAWE (1999) os efeitos dos episódios de poluição urbana na saúde aumentam na presença de gases como por exemplo ozono e partículas.

As partículas de aerossóis influenciam directamente a saúde humana, porque podem ser veículos de infecções e provocar alergias ou enfermidades respiratórias ou cardíacas.

Os efeitos são condicionados pelas propriedades físicas (nomeadamente a distribuição do tamanho pela massa e pelo número, área de superfície, higroscopicidade) e químicas (composição) das partículas. O seu tamanho determina a profundidade de penetração no aparelho respiratório. Segundo a ISO (*International Organization of Standard*) as partículas dividem-se em três classes fundamentais:

- “A fracção inalável, isto é a fracção das partículas em suspensão existentes no ar ambiente que são inaladas pelo nariz e/ou boca (partículas de diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 80 μm)”;
- “A fracção torácica, que é a parcela de partículas inaladas que penetra no sistema respiratório para além da laringe (fracção que corresponde, em termos de monitorização, às partículas PM_{10})”;
- “A fracção respirável, que corresponde à fracção de partículas inaladas capaz de penetrar até à região alveolar (fracção que corresponde, em termos de monitorização, às partículas $\text{PM}_{2.5}$)” (Tente, 2005).

As partículas PM_{10} depositam-se por sedimentação e as mais pequenas (finas e ultra-finas) por difusão. As que possuem um diâmetro inferior a $0.01\ \mu m$ depositam-se nas vias respiratórias superiores (nariz e parte superior da faringe).

A composição química, por outro lado, determina a reacção do aparelho respiratório ou seja a resposta do organismo. A toxicidade está associada fundamentalmente às partículas que contêm metais pesados como o chumbo, mercúrio e cádmio, no entanto não é apenas a presença de determinado elemento químico que determina os efeitos na saúde, mas sim a fórmula química com que esse elemento está presente. São predominantemente as partículas finas sobretudo formadas em processos de combustão que contêm uma mistura de cinzas, compostos orgânicos, sulfatos, nitratos, metais traço e outros compostos tóxicos. Algumas partículas podem funcionar como transportadores de adsorventes químicos ou gases funcionando como rastilho de efeitos adversos na saúde. As partículas inaladas que contenham compostos solúveis ou que se encontrem no estado líquido são mais facilmente absorvidas pelos tecidos onde se depositam. A deposição nos alvéolos é maior se os aerossóis forem mais higroscópicos, como o sulfato. Do ponto de vista dos efeitos na saúde é muito importante saber, por exemplo, em que estado físico é que compostos semi-voláteis são inalados, se sob a forma de vapor se associados a partículas.

Estudos epidemiológicos provaram uma associação estatisticamente significativa entre a exposição à matéria particulada e vários tipos de efeitos na saúde (WHO, 2002). Estudos recentes sugerem que uma exposição de curto prazo a partículas está associada a efeitos na saúde mesmo para níveis baixos. Uma exposição a longo prazo à matéria particulada no ar está associada a uma redução de esperança de vida. Essa redução está associada ao aumento da mortalidade por cancro do pulmão e a efeitos crónicos como o aumento da taxa de bronquites e redução da função pulmonar (EC, 2004). Não há até ao momento informação suficiente que explique a relação directa entre a exposição à matéria particulada e os efeitos cardíacos (WHO, 2003). Estudos conduzidos nos Estados Unidos da América sugerem que a esperança de vida encurta em cerca de 1 ano em comunidades expostas a altas concentrações comparadas com as expostas a concentrações baixas. Outros estudos revelaram que a existência de bronquites e a redução da função pulmonar em crianças e adultos está associada a uma exposição de concentração média anual de partículas da ordem de $20\ \mu m\ PM_{2.5}$ e de $30\ \mu m\ PM_{10}$ (WHO, 2000).

Há uma forte evidência que as partículas finas, usualmente definidas como PM_{2.5}, causam efeitos mais nefastos do que a fracção PM₁₀ (Dockery *et al*, 1993). Desconhece-se ainda o impacte resultante das partículas ultra-finas (UFP), mas esta fracção pode produzir importantes respostas biológicas devido ao seu elevado número e área de superfície. De facto há indicação que os efeitos adversos são devidos fundamentalmente à concentração por número e composição química.

Resumindo, os estudos epidemiológicos realizados até à data não permitiram definir um limiar de concentração de partículas abaixo do qual não se verifiquem efeitos adversos na saúde humana (WHO, 2002). Deste modo, a WHO ainda não definiu valores guia que garantam que a exposição a valores de concentração inferiores não tragam qualquer risco para a população. Não obstante, grupos sensíveis, nomeadamente crianças, idosos, doentes diabéticos ou com doenças respiratórias ou cardíacas, podem ser afectados por concentrações muito próximas desses eventuais valores guia. A epidemiologia terá então que ser determinante na adopção desses valores legais. As relações ou curvas exposição-concentração para diferentes indicadores de impacte na saúde fornecem, na falta desses limiares, informação mais realista (WHO, 2003).

2.4.2 Impactes no Ambiente

Os principais impactes resultantes de um incremento de partículas em suspensão na atmosfera repercutem-se nos ecossistemas terrestres e aquáticos, nos edifícios e monumentos, bem como no clima.

Os efeitos dos aerossóis no clima do planeta são contabilizados em termos de forçamento radiativo, devido à sua interacção com a radiação solar. O forçamento radiativo é usado para estimar os impactes climáticos assumindo que existe uma relação entre o forçamento médio global e a resposta de equilíbrio da temperatura média global à superfície (IPCC, 2001). O forçamento é negativo quando tende a diminuir a temperatura do planeta, desequilibrando em sentido negativo o balanço energético do planeta (Benito, 2001).

Os aerossóis apresentam um forçamento radiativo directo porque difundem e/ou absorvem a radiação de pequeno e grande comprimento de onda, perturbando o

balanço energético do sistema terra-atmosfera. O efeito dos aerossóis na radiação de grande comprimento de onda é mais pequeno do que na de pequeno comprimento de onda, porque a transparência de aerossóis aumenta para grandes comprimentos de onda, e porque estão mais concentrados na baixa troposfera onde a temperatura que governa a emissão é semelhante à temperatura à superfície (Pueschel, 1995). Os aerossóis também alteram a formação e a eficiência da precipitação originando um forçamento radiativo indirecto associado às alterações no processo de formação das nuvens (IPCC, 2001). Os efeitos indirectos dos aerossóis apresentam-se de duas formas:

- 1- um incremento de aerossóis induz um aumento da concentração das gotas das nuvens, um decréscimo no tamanho das gotas, para o mesmo conteúdo em água líquida, e um aumento do albedo das nuvens;
- 2- a redução do tamanho das gotas das nuvens diminui a eficiência da precipitação, tende a aumentar o conteúdo em água líquida e o tempo de vida das nuvens a espessura destas e consequentemente altera o seu albedo.

O segundo efeito está menos estudado que o primeiro, mas especula-se, que tal como o primeiro, será de sinal negativo. O facto dos aerossóis aquecerem ou arrefecerem o sistema terra-atmosfera depende da intensidade do albedo de difusão simples relativamente ao albedo de superfície (Pueschel, 1995).

A quantificação do forçamento radiativo dos aerossóis é muito complexa devido à grande variabilidade espacial e temporal das partículas na atmosfera. A distribuição do tamanho das partículas, a sua composição química, bem como a sua origem são factores preponderantes para estimar o forçamento radiativo.

Questionou-se em tempos, se a retrodifusão da radiação de pequeno comprimento de onda (solar) por partículas por exemplo de sulfato compensaria parcialmente o aquecimento provocado pelos gases de efeito de estufa (IPCC, 2001). No entanto, uma vez que os aerossóis têm um tempo de residência na atmosfera mais curto que os gases de efeito de estufa, os efeitos de compensação acima mencionados restringem-se a uma escala regional.

As partículas compostas por espécies solúveis na água, como os sulfatos, cloreto de sódio, outros sais solúveis em água e os ácidos inorgânicos são eficientes núcleos de condensação, contribuindo assim para o forçamento radiativo indirecto.

No que se refere às partículas de sulfato de origem antropogénica, uma vez que são produzidas através das reacções químicas a partir dos gases precursores, não estão ainda contabilizados totalmente os seus efeitos no clima.

As partículas de nitrato originam um impacte radiativo reduzido. Estudos recentes atribuem-lhe um impacte à escala regional (Benito, 2001). As partículas constituídas por compostos de carbono constituem uma fracção muito variada. A fracção orgânica está associada a um forçamento radiativo directo e indirecto, enquanto que o efeito indirecto está mais uma vez associado à solubilidade de alguns destes compostos que constituem eficientes núcleos de condensação. A fuligem, por outro lado, é um bom absorvente da radiação solar e portanto apresenta um efeito directo no clima.

Os efeitos radiativos das poeiras de deserto e das partículas salinas (IPCC, 2001) têm sido alvo de estudos recentes. As incertezas referentes a esses efeitos devem-se ao facto do tamanho e índice de refacção de ambos os tipos apresentarem uma gama de valores muito ampla. As partículas salinas, dado serem eficientes núcleos de condensação das nuvens na atmosfera marinha e uma vez que os oceanos representam 2/3 da superfície da terra, terão um forçamento indirecto bastante significativo. As poeiras apresentam um albedo de difusão simples muito baixo. Quando estas têm na sua composição também material solúvel, por exemplo sulfatos, convertem-se em efectivos núcleos de condensação, afectam a microfísica das nuvens e originam assim efeitos indirectos.

Os aerossóis de origem vulcânica têm um tempo de residência na atmosfera (estratosfera) bastante grande com repercussões ao nível do balanço da temperatura global. Na alta troposfera parecem ser importantes para a formação das partículas de gelo.

As partículas em suspensão na atmosfera devido ao facto de difundirem ou absorverem a radiação solar originam uma redução da visibilidade atmosférica (Husar *et al.*, 2000). Por isso, são predominantemente as finas as que mais eficientemente reduzem a visibilidade. De entre estas, incluem-se as de sulfato, de nitrato, de carbono elementar (cinzas) ou orgânico ou poeiras naturais do deserto. O ozono, uma vez que influencia a produção de partículas secundárias, interfere indirectamente na redução da visibilidade (Aneja *et al.*, 2004).

A duração e a taxa de geração das partículas na baixa atmosfera e a consequente dispersão ou tempo de residência na atmosfera dependem do tipo de emissão, do tipo de superfície e das condições meteorológicas.

A deposição das partículas influencia a composição química e a dinâmica dos ecossistemas terrestres e marinhos. A resposta dos ecossistemas à deposição das partículas é função do nível de sensibilidade do ecossistema. Alterações na estrutura dos ecossistemas e do funcionamento dos processos ecológicos podem ser escalados no tempo e no espaço e propagar-se a níveis mais complexos da comunidade. A deposição de partículas afecta os solos destinados à agricultura e contribui para a acidificação dos solos e lagos. Os efeitos das partículas na vegetação dependem do tamanho da partícula e da sua composição química. Um depósito excessivo de poeira nas plantas, constituindo uma espécie de capa, pode impedir a fotossíntese e obstruir os estomas das folhas.

A acção das partículas sobre os materiais (edifícios urbanos, monumentos históricos, entre outros exemplos) pode manifestar-se quer pela sedimentação destas sobre os mesmos, afectando o aspecto exterior, quer por reacções químicas deteriorando-os.

No que se refere aos aerossóis de origem mineral, oriundos dos desertos e transportados para longas distâncias, a sua deposição contribui para a formação dos sedimentos no fundo do mar (Griffin *in* D'Almeida e Shutz, 1983), para a formação dos solos de Loesse, por exemplo, nos desertos (Avila *et al.*, 1998). Os nutrientes inerentes às poeiras do deserto são benéficos aos solos das florestas do Sul da Europa e da Amazónia e parecem exercer uma influência na produtividade do fitoplâncton do Oceano Atlântico Norte. Este tipo de poeiras devido à sua constituição alcalina neutraliza os poluentes ácidos depositados nos solos (Loÿe-Pilot *et al.*, 1986).

Os compostos solúveis das poeiras minerais alteram a composição iónica da precipitação (D'Almeida e Shutz, 1983).

3 METODOLOGIA

3.1 *Análise às séries temporais de partículas inaláveis - PM₁₀*

Neste estudo foram utilizados dados horários de concentrações de partículas à superfície - PM₁₀ e PM_{2.5} - medidos em continuo nas estações da rede de monitorização da qualidade do ar da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale do Tejo (CCDR-LVT) do período de 1999-2003. Esta rede inclui estações da aglomeração da Área Metropolitana Norte, aglomeração da Área Metropolitana Sul, aglomeração de Setúbal e zona de Vale do Tejo e Oeste (Figura 11).

A validação e agregação dos dados foram efectuadas pela CCDR-LVT.

Em Julho de 1999 as PM₁₀ eram medidas apenas em quatro estações de monitorização da CCDR-LVT (Entrecampos, Lavradio, Av. da Liberdade e Olivais) enquanto no final do ano de 2002 eram 14 as estações que mediam a fracção anteriormente referida e duas as que mediam PM_{2.5}.

As estações estão equipadas com analisadores automáticos de partículas PM₁₀ e/ou PM_{2.5}, da marca Environment S.A., modelo MP101M, que diferem apenas na cabeça de amostragem (tomada de ar). Os analisadores determinam a quantidade de partículas em suspensão na atmosfera com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm e/ou 2.5 µm pelo método de absorção de radiação β.

- Legenda**
- aglomerações CCDRLVT
 - Tipo de Estações**
 - Fundo
 - Industrial
 - Tráfego
 - estação meteorológica

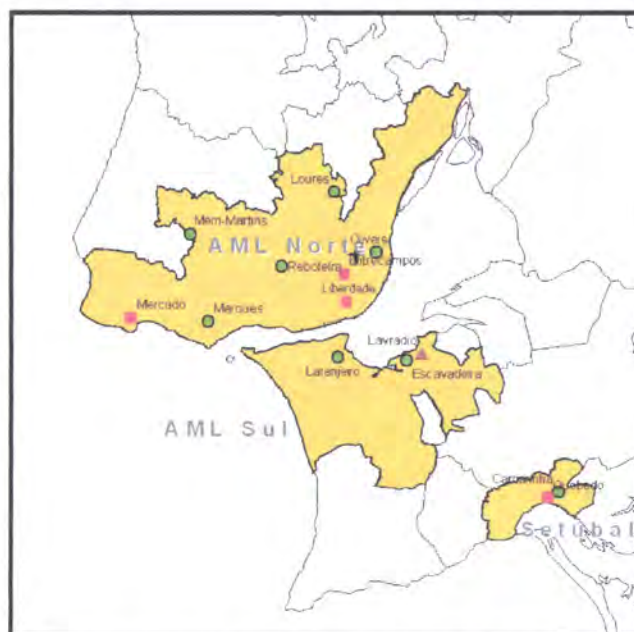


Figura 11 – Mapa representando as estações da qualidade do ar da CCDR-LVT e a estação meteorológica de Lisboa Gago Coutinho (IM) [Elaborado por Hugo Tente]

Os analisadores de $PM_{2.5}$ medem a fracção de partículas finas e os analisadores de PM_{10} medem as partículas de diâmetro aerodinâmico inferior a $10\ \mu m$. A fracção referente às partículas grosseiras poderia ser obtida por um analisador que determinasse a fracção cujo diâmetro esteja compreendido entre 2.5 e $10\ \mu m$ ou por cálculo da diferença entre as medições dos 2 analisadores acima referidos.

O Decreto-Lei n.º 111/2002, de 16 de Abril, no seu anexo XI (Secção IV), indica que o método de referência para amostragem e medição de partículas PM_{10} é o descrito na Norma EN 12341, a qual define o método gravimétrico como método de referência. No entanto, este diploma prevê a utilização de outros métodos desde que se possa demonstrar que os seus resultados são equivalentes aos do método de referência, ou qualquer outro método, desde que se possa demonstrar que possui uma relação sistemática com o método de referência. Neste caso, os resultados devem ser corrigidos pela aplicação de um factor adequado para produzirem resultados equivalentes aos que teriam sido conseguidos mediante a utilização do método de referência.

Atendendo a que na Rede de Monitorização da CCDR-LVT são utilizados analisadores automáticos para medição de PM_{10} e $PM_{2.5}$, todos os dados obtidos nas estações são corrigidos através da aplicação do factor apropriado, no sentido de obter resultados equivalentes aos do método de referência. Em Portugal, na

sequência de ensaios de inter-comparação entre os dois métodos, realizados pelo Instituto do Ambiente, foram estabelecidos os seguintes factores de correcção multiplicativos: 1.11 para estações urbanas de fundo e 1.18 para estações de tráfego.

Para o cálculo do valor médio diário, para os dados referentes aos anos de 2002 e 2003, utilizou-se como critério de agregação de dados um mínimo de 13 valores horários em 24 horas, desde que não existissem mais de seis horas consecutivas sem dados, de acordo com o definido no EC (2002). No que concerne aos dados referentes ao período de 1999 a 2001 foram tratados em conformidade com a legislação em vigor na altura, que exigia 75 % de dados válidos.

As estações são classificadas de acordo com a Decisão da Comissão 2001/752/CE, de 17 de Outubro de 2001, no que diz respeito às fontes de emissão dominantes, em estações de tráfego, de fundo e industrial (Tabela 2).

Tabela 2 – Estações da rede de monitorização da qualidade do ar da CCDR-LVT

Região	Tipo	Estação	Latitude	Longitude	Início Funcionamento
AML Norte	Tráfego	Av. Liberdade	38°43'13"	9°08'49"	Fev-98
		Cascais-Mercado	38°42'00"	9°25'12"	Set-02
		Entrecampos	38°44'52"	9°08'59"	PM10 / Mar-92
					PM2.5 / Mar02
	Fundo	Loures - Centro	38°49'44"	9°09'55"	Jun-01
		Mem Martins	38°47'06"	9°20'50"	Out-02
		Quinta Marquês	38°41'51"	9°19'24"	Set-02
		Olivais	38°46'08"	9°06'29"	Jul-99
		Reboleira	38°45'15"	9°13'51"	Fev-01
AML Sul	Tráfego	Quebedo	38°31'27"	8°53'39"	Abr-02
	Industrial	Lavradio	38°40'00"	9°02'52"	Abr-99
		Escavadeira	38°39'31"	9°04'00"	Set-01
	Fundo	Laranjeiro	38°39'49"	9°09'28"	Jan-01
		Camarinha	38°31'50"	8°52'23"	Nov-02
Vale do Tejo	Fundo	Chamusca	39°21'09"	8°27'58"	Nov-02

Numa primeira fase analisaram-se as séries temporais de PM_{10} , de Julho de 1999 (mês em que a rede passou a contar com quatro estações a medir este poluente) a Dezembro de 2003, das estações de Entrecampos, Lavradio, Av. da Liberdade e Olivais, nomeadamente a sua tendência, e determinaram-se os parâmetros básicos de estatística (mediana, valor mínimo e máximo e percentis) através da construção de gráfico de caixas, com base no software Statistica®. Utilizaram-se apenas estas quatro estações para se garantir a maior longevidade da série.

Posteriormente, utilizou-se a estação dos Olivais, como estação de referência, dado estar afastada da influência directa de vias rodoviárias e apresentar uma forte correlação com as outras estações. Analisou-se ao longo do período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003 (garantindo quatro períodos das quatro estações do ano) a variação mensal e sazonal das concentrações de PM_{10} .

Analisou-se a distribuição das concentrações médias de PM_{10} nas estações de Entrecampos, Avenida da Liberdade, Olivais e Lavradio por estação do ano (padrão de sazonalidade).

Analisou-se a variação dos valores da concentração média de PM_{10} ao longo da semana para todas as estações. Note-se que no período coberto por esta análise (Julho de 1999 a Dezembro de 2003) houve estações com dados de 4 anos e meio e outras com 14 meses de dados.

Observou-se o comportamento de PM_{10} ao longo do dia para a estação dos Olivais e da Avenida da Liberdade (estação de tráfego intenso), bem como a variação desse mesmo comportamento por estação do ano.

Compararam-se os valores médios diários de concentração de PM_{10} registados nas estações da qualidade do ar com o valor limite legislado. Identificou-se para este período de cerca de quatro anos e meio os dias em que as concentrações excederam os valores limite, e destes seleccionaram-se dias com excedências consecutivas (episódios de poluição). Considerou-se episódio de poluição a persistência de 2 ou mais dias com concentrações superiores ao valor limite em pelo menos 3 estações da rede de qualidade do ar.

3.2 *Análise à influência da meteorologia nas concentrações de partículas inaláveis - PM_{10}*

Foram utilizados nesta fase os dados de qualidade do ar da estação dos Olivais, anteriormente referenciada, e os dados meteorológicos de superfície e de altitude, da estação Lisboa Gago Coutinho da rede meteorológica do Instituto de Meteorologia (IM).

Começou-se por analisar a frequência de ocorrência dos episódios de poluição por mês e por estação do ano. Visando a identificação de padrões sinópticos associados a episódios de poluição efectuaram-se as seguintes tarefas:

- associaram-se os episódios de PM_{10} à superfície às situações sinópticas que ocorreram nesses dias com base em cartas de análise de superfície do modelo numérico de previsão do tempo ECMWF (IM, 1999 a 2003);
- criaram-se classes de situações sinópticas associadas a esses episódios, com base num critério subjectivo;
- analisou-se a frequência anual e por estação do ano das ocorrências de cada situação sinóptica e dos episódios associados, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003. Foi utilizado para o mesmo período outro tipo de classificação sinóptica (gerada de um modo automático) (Mendes *et al.*, 2002; Trigo e Da Câmara, 2000);
- analisou-se a concentração de PM_{10} associada a cada situação sinóptica;
- analisou-se a variação da altura máxima da camada de mistura (estimada) com a situação sinóptica, com o mês e com a concentração de partículas. Esta camada de mistura foi estimada com a temperatura máxima registada pelo método da adiabática seca (Holzworth, 1967), utilizando a sondagem aerológica da estação Lisboa Gago Coutinho (IM);
- estudou-se a variação dos valores da concentração de PM_{10} com o rumo do vento.

De forma a analisar a relação entre a concentração de PM_{10} e as variáveis meteorológicas, abaixo discriminadas, utilizaram-se os programas de estatística Statistica® e Systat®, para os seguintes cálculos:

- análise estatística básica descritiva das variáveis meteorológicas (valores diários): temperatura do ar, pressão atmosférica, humidade relativa, intensidade do vento e componentes zonal e meridional do vento. Foram utilizadas estas duas componentes porque no modelo é estatisticamente impossível considerar a variável rumo do vento pelo facto de esta ser descontínua. Estas duas variáveis representam os vectores geométricos do rumo e intensidade do vento;

- correlação existente entre as variáveis meteorológicas e a concentração de PM_{10} à superfície da estação dos Olivais através da regressão linear simples (*scatter plot*) e da regressão linear múltipla em modo de eliminação de variáveis.

Refira-se que se utilizou para a regressão linear simples os valores diários das variáveis meteorológicas acima mencionadas, bem como o rumo do vento (predominante diário), a precipitação acumulada diária e as variáveis de altitude (temperatura e humidade relativa do ar (700,850 e 925 hPa)).

No caso da regressão linear múltipla normalizaram-se as variáveis (variáveis adimensionais com uma média igual a zero e um desvio padrão igual a um) para se anular o problema da utilização de diferentes escalas de valores consoante as variáveis em questão. O modelo utilizou como variável dependente a concentração de PM_{10} e como variáveis independentes as variáveis utilizadas no modelo anterior e ainda a situação sinóptica à superfície, o geopotencial (1000, 850, 700 e 500 hPa), temperatura e humidade relativa (925,850, 700) e a altura da camada de mistura.

Foi também usada a análise de regressão em árvore (CART – *Classification and regression tree*) com as mesmas variáveis. O CART é um procedimento estatístico concebido para classificar dados em diversos grupos (EPAa, 2003). As equações de regressão linear múltipla e o modelo CART foram utilizados para previsão estatística de poluentes (PM e O_3) nos Estados Unidos por Casmassi (1987).

Averiguou-se ainda a contribuição das variáveis meteorológicas na concentração de partículas à superfície pela técnica da análise de componentes principais (ACP). A base da ACP assenta na relação entre as variáveis, de forma que possam ser descritas por outro grupo de variáveis chamados factores. Cada factor ou componente principal corresponde a uma variável não observada que explica a variância das variáveis observadas. A análise factorial parte da matriz de correlações (variáveis normalizadas), na qual se calculam os valores próprios e vectores próprios. Cada vector próprio corresponde a um dos factores independentes, representando o respectivo valor próprio a variância atribuída a esse factor. Os algoritmos para a determinação dos vectores próprios calculam estes, de forma que a maior fracção possível da variância total seja atribuída ao primeiro vector, a maior fracção da variância restante ao segundo vector e assim sucessivamente (Almeida, 2004).

Efectuando uma rotação varimax maximiza-se a correlação de cada componente com cada parâmetro observado (Tente, 2005).

Seleccionou-se para um estudo mais aprofundado 5 dos identificados episódios de poluição. Consideraram-se, como critérios de escolha, os seguintes:

- a) as situações sinópticas que ao longo do estudo se revelaram mais desfavoráveis no âmbito da qualidade do ar;
- b) as situações meteorológicas em diferentes estações do ano associadas a episódios de poluição curtos de forma a não manusear uma quantidade excessiva de informação.

Relativamente a estes episódios e para um dia antes e um dia depois analisou-se:

- ao nível da escala sinóptica, campos meteorológicos obtidos de análises e/ou reanálises do modelo ECMWF. O modelo ECMWF é um modelo global determinístico, que em Janeiro de 2005 apresentava uma resolução de 39 km. Os campos foram obtidos através do Arquivo do Centro Europeu e do IM. Optou-se por utilizar para todos os episódios os dados pós-processamento numa malha de 1° para homogeneização de critérios. Refira-se no entanto que relativamente aos episódios referentes aos anos de 1999 e 2000 do arquivo ERA40, para obter a malha de 1° houve interpolação dado que a malha dessa altura era de 2,5°;
- ao nível da mesoscala, campos obtidos da análise do modelo de área limitada (ARPEGE/ALADIN). A versão do modelo do ALADIN que corre no IM (ALADIN/Portugal) tem uma resolução de 12 km, no que se refere à previsão. No entanto “as análises do ALADIN/Portugal utilizadas neste estudo não são mais do que análises do modelo ARPEGE depois de ter sido feita uma interpolação da malha deste modelo na área de Portugal (aproximadamente 21 km) para a malha do ALADIN/Portugal (12.7 km), seguida da aplicação da técnica de inicialização utilizando filtros digitais” (Belo, 2003). No que se refere à análise o espaçamento da malha é de cerca de 21 km (resolução do ARPEGE).

Os campos do ECMWF e do ALADIN analisados estão resumidos na Tabela 3. Apenas foram descritos aqueles que pareceram relevantes para cada situação sinóptica.

As retro-trajectórias traçadas por um modelo desenvolvido pelo Serviço Meteorológico Holandês (KNMI), baseado nas análises do vento produzidas pelo modelo ECMWF, e aí disponíveis, para determinar o papel do transporte a longa distância nas concentrações de PM. Foram efectuadas trajectórias de 120 horas para os níveis de chegada 850, 925 e 1000 hPa e para o nível 700 hPa para os casos em que a massa de ar era oriunda do Norte de África (Reiff *et al.*, 1986; Dayan *et al.*, 1991 e Carlson e Prospero, 1972). As massas de ar de origem da partícula foram classificadas segundo Bergeron (Silva, 1951) e segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1978). Escolheu-se mais uma vez os Olivais como estação de referência da região de Lisboa e ainda para o último episódio a estação da Chamusca. Quanto às horas de chegada utilizaram-se as mais próximas dos picos diários de concentrações e/ou das concentrações mais baixas.

Tabela 3 – Campos dos modelos ECMWF e ALADIN

Campo do modelo / Níveis	Superfície	1000hPa	950hPa	925hPa	850hPa	700hPa	500hPa	300hPa
Pressão nível médio mar (nmm)	X							
Pressão nmm/temperatura 2m	X							
Altura do geopotencial				X	X	X	X	
Temperatura 2m/vento 10m	X							
Temperatura		X		X	X			
Humidade relativa		X	X	XX	XX	X	X	
Temperatura termómetro molhado					X			
Vento		X	X	X	X			
Advecção temperatura		XX	X	XX	XX	X	X	
Advecção humidade específica		XX	X	XX	XX	X		
Advecção vorticidade					X		X	
Convergência da humidade		XX	X	XX	XX			
Ventos verticais					X	X	X	
Corrente de jacto								X

Estas foram, quando necessário e possível corroboradas por imagens de satélite adquiridas nos seguintes sites: <http://seawifs.gsfc.nasa.gov> e em <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/IMAGEM/index.html>.

Para obter, processar e visualizar os campos meteorológicos acima referidos foram utilizadas aplicações informáticas específicas desenvolvidas em sistema operativo UNIX ou recorrendo ao programa METVIEW para o sistema operativo LINUX desenvolvidas no IM (Belo, 2004; Lopes *et al.*, 2001; ECMWF, 2002; ECMWF, 2003).

Na perspectiva de uma análise meteorológica local analisou-se ainda:

- observações meteorológicas de altitude obtidas das sondagens das 0 e 12 UTC da estação do IM - Lisboa Gago Coutinho;
- o comportamento ao longo do dia das concentrações de PM_{10} simultaneamente para as estações de tráfego e de fundo, de forma a compreender melhor o episódio e inferir sobre a escala de poluição (local ou regional);
- o comportamento ao longo do dia das concentrações de PM_{10} concomitantemente com as variáveis meteorológicas (temperatura do ar, humidade relativa, rumo e velocidade do vento, pressão ao nível médio do mar e precipitação) para a estação dos Olivais. Só se apresentam os resultados que se consideram relevantes.

Sempre que se justificou, analisou-se para alguns dos episódios seleccionados:

- as concentrações de $PM_{2.5}$ *versus* PM_{10} de forma a inferir sobre o tamanho das partículas e consequentemente identificar a sua origem;
- a variação de PM_{10} com gases poluentes primários ((dióxido de enxofre(SO_2)) e (óxidos de azoto(NO_x))), para mais uma vez se identificar a fonte de poluição.

4 RESULTADOS

4.1 *Análise às séries temporais de partículas inaláveis - PM_{10}*

O período de dados (Julho de 1999 a Dezembro de 2003) que se utilizou no trabalho foi condicionado pela exigência de um número mínimo de estações na área de estudo (quatro, a partir de Julho de 1999), bem como pelas limitações temporais associadas à execução do trabalho (Dezembro de 2003). As estações que já funcionavam em Julho de 1999 eram as estações de Entrecampos e Av. da Liberdade (tráfego), Lavradio (industrial) e dos Olivais (fundo). Analisou-se a sua tendência ao longo desses anos (Figura 12) e verificou-se que as estações apresentam tendência para diminuir excepto a estação de Entrecampos.

Na Figura 13 apresentam-se os parâmetros básicos de estatística sob a forma de gráfico de caixas para as quatro estações. Realce-se que 50 % das concentrações registadas na Av. da Liberdade estão acima do valor limite e que a estação dos Olivais é a que apresenta concentrações mais baixas (75 % dos dados estão abaixo de $40 \mu\text{m}/\text{m}^3$). Todas as estações apresentam um número elevado de valores distantes da mediana, identificados como *outliers*.

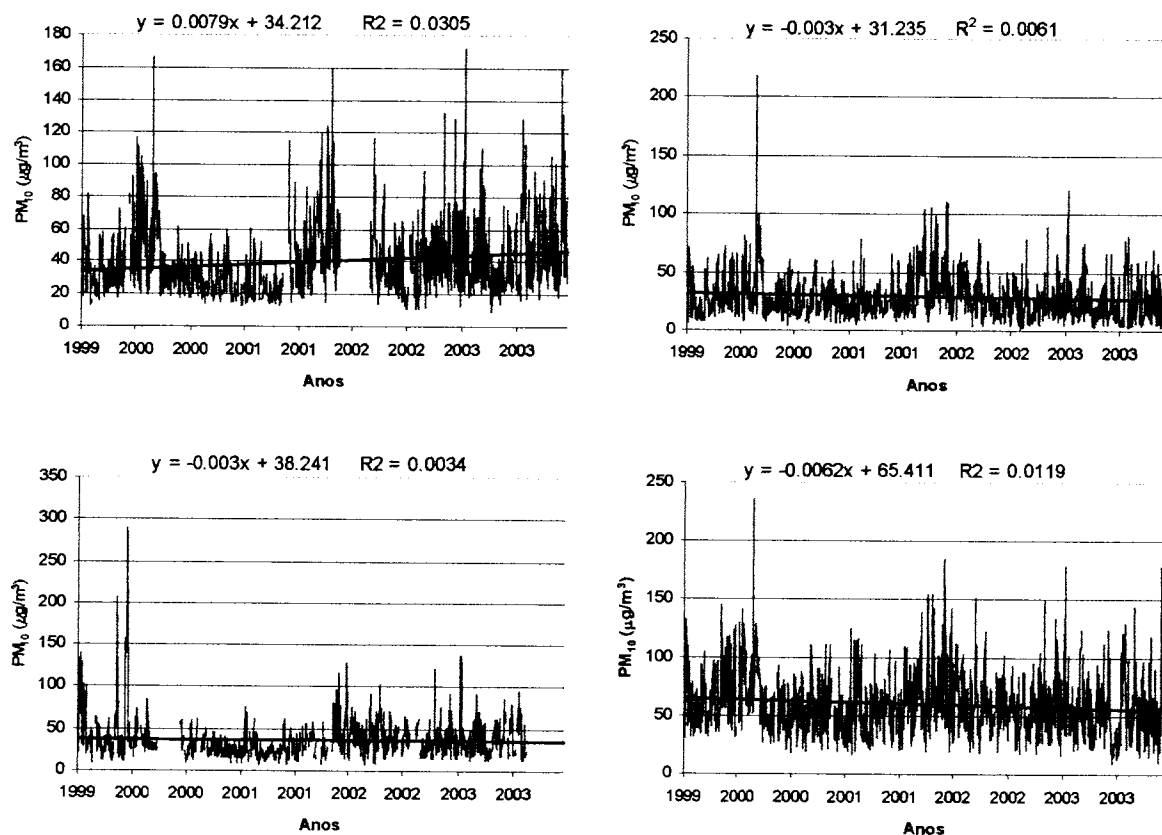


Figura 12 - Tendência à série de PM_{10} das estações da qualidade do ar de a) Entrecampos, b) Olivais, c) Lavradio e d) Av. da Liberdade da rede CCDR-LVT (Julho de 1999 a Dezembro de 2003)

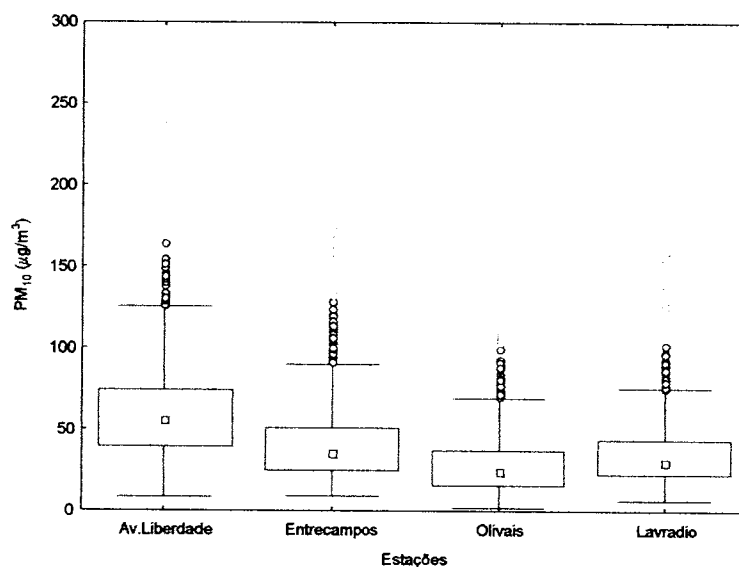


Figura 13 – Gráfico de caixas referente às médias diárias de PM_{10} das estações da Av. da Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de Julho de 1999 a Dezembro de 2003

Efectuou-se uma matriz de correlação entre os valores médios diários das quatro estações e verificou-se que a correlação da estação dos Olivais com as estações de Entrecampos e da Avenida da Liberdade é igual ou superior a 72 %. Este valor que determina um nível de associação significativo com as outras estações e o facto da estação dos Olivais ser classificada como urbana de fundo reforça a escolha desta estação como referência para o nosso estudo.

Apresenta-se na Figura 14 um gráfico com os valores médios e máximos mensais de concentrações de PM_{10} registados na estação dos Olivais no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003. Da análise deste gráfico destaca-se:

- o valor máximo obtido em Fevereiro de 2000;
- de um modo geral o ano de 2001 apresenta valores médios e máximos mais elevados (as concentrações máximas aumentam de Abril a Dezembro);

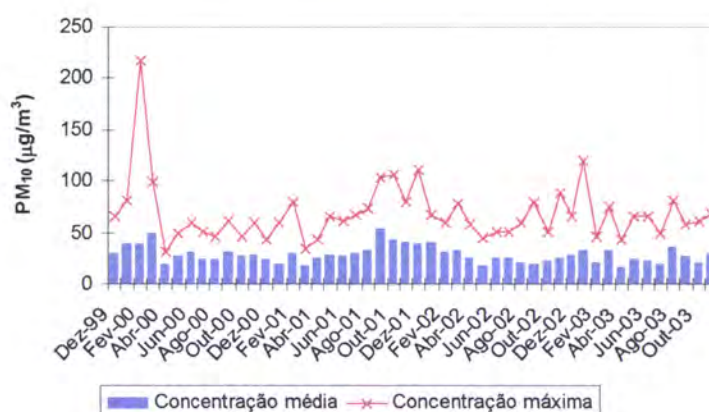


Figura 14 – Concentrações médias e máximas de PM_{10} na estação dos Olivais (valores médios diários), referentes ao período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003.

A análise da Figura 15 permite identificar Abril com o mês em que as concentrações são mais baixas e Março o mês em que elas são mais altas. Resultados de um estudo efectuado no período de 2000 a 2003 na Coruña (Iglesias *et al.*, 2005) apontaram o mês de Março como aquele em que se observaram concentrações mais elevadas numa estação classificada como rural, atribuída segundo Querol *in* Iglesias, *et al.* (2005) a episódios de poeiras do deserto.

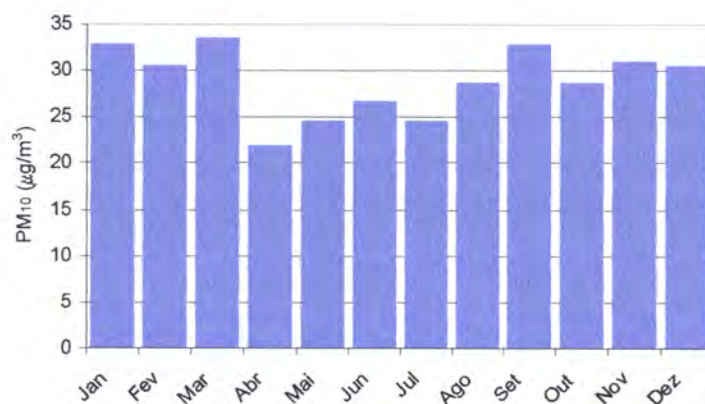


Figura 15 - Distribuição mensal das concentrações médias diárias de PM₁₀ na estação dos Olivais, referente ao período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Testou-se qual a função de distribuição que melhor descrevia as concentrações de partículas. Concluiu-se que a distribuição dos valores médios diários das concentrações segue uma lognormal, na medida em que logaritmizando os dados, reduzindo à normal padrão e aplicando o teste de kolmogorov-Smirnov se aceita com 95 % de confiança que os dados seguem essa distribuição. O ajustamento a essa distribuição indica a presença de dados assimétricos e que a maior frequência se verifica na extremidade esquerda ou seja com concentrações mais baixas. Optou-se por apresentar, na sequência do gráfico anterior, apenas a distribuição referente ao mês de Março e de Abril (Figura 16). No mês de Março observam-se com maior frequência concentrações inferiores a 20 µg/m³, mas ocorre com uma certa frequência concentrações entre 40 e 80 µg/m³. No mês de Abril as concentrações distribuem-se de uma forma quase simétrica em torno de um valor médio (20 µg/m³).

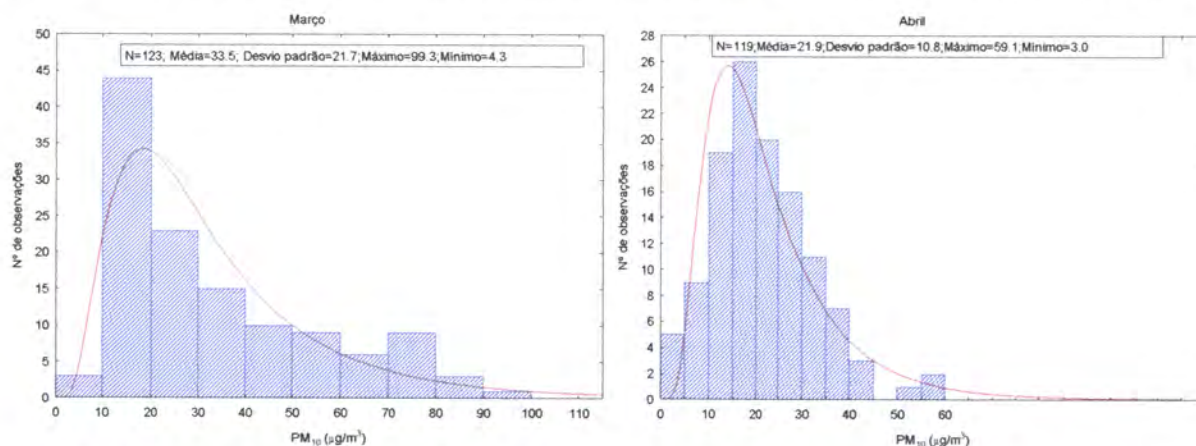


Figura 16 - Histograma dos valores médios diários da concentração de PM₁₀ referente ao mês de a) Março b) Abril, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

No que se refere à variação sazonal (Figura 17) observa-se que o valor da mediana das concentrações é mais elevado no Outono e no Inverno e mais baixo na Primavera, não obstante se observarem muito mais “outliers” na Primavera. Foram observados valores extremos no Inverno e na Primavera.

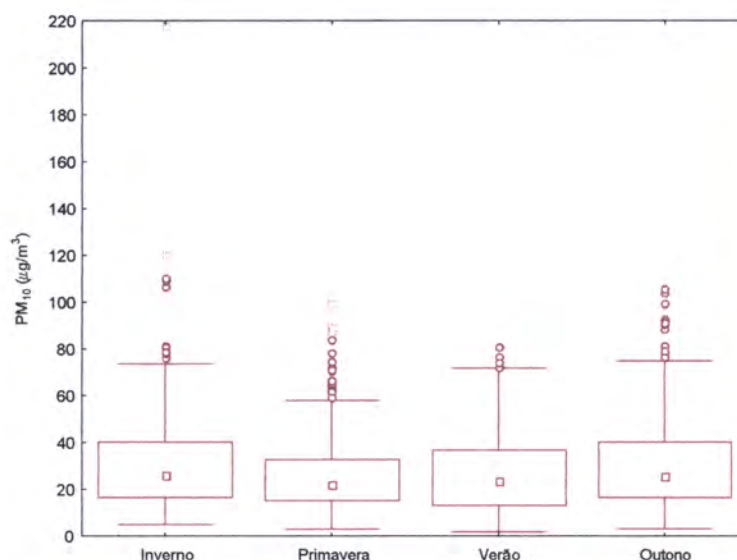


Figura 17 - Gráfico de caixas dos valores médios diários por estação do ano referente à estação dos Olivais, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

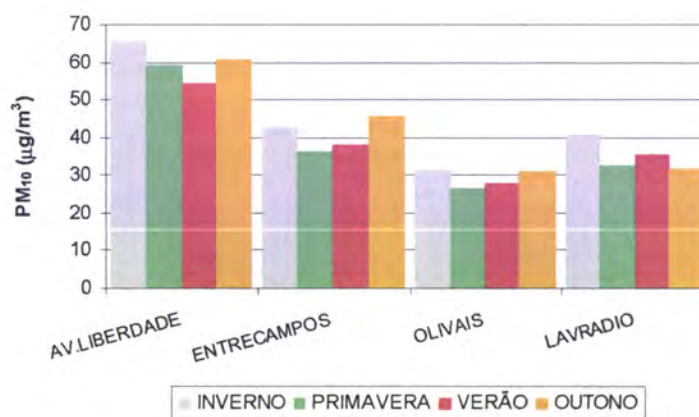


Figura 18 - Distribuição dos valores médios diários por estação do ano (padrão de sazonalidade) referente às estações dos Olivais, Entrecampos, Av. da Liberdade e Lavradio, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Em termos médios ao analisar-se o padrão de sazonalidade nas quatro estações da cidade verifica-se o seguinte (Figura 18):

- na estação de Entrecampos as concentrações mais elevadas registaram-se no Outono e as mais baixas na Primavera (refira-se no entanto que estação não funcionou de Dezembro de 2001 a Março de 2002);
- na estação da Av. da Liberdade as concentrações mais altas verificaram-se no Inverno e as mais baixas no Verão.

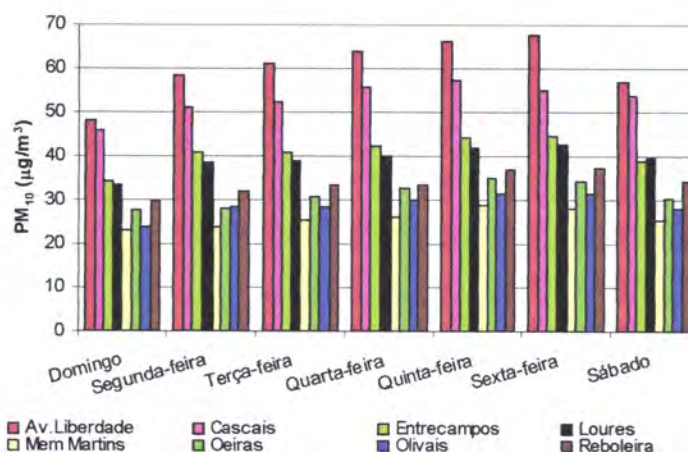


Figura 19 - Concentrações médias diárias por dia de semana referentes às estações da AML Norte pertencentes à rede da CCDR-LVT, no período de Julho de 1999 a Dezembro de 2003

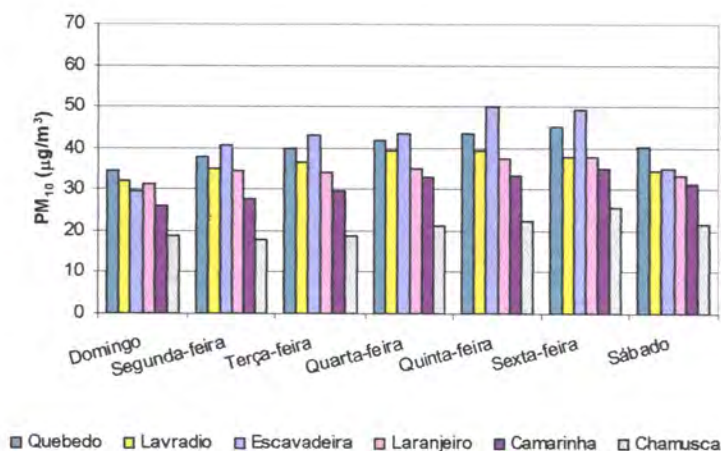


Figura 20 - Concentrações médias diárias por dia de semana referentes às estações da AML Sul e Chamusca pertencentes à rede da CCDR-LVT, no período de Julho de 1999 a Dezembro de 2003

No sentido de analisar o padrão semanal das concentrações de PM₁₀ elaborou-se um gráfico com a representação das concentrações em cada dia da semana para as 14 estações (Figura 19 e Figura 20). Observa-se um aumento gradual das

concentrações ao longo da semana, com o pico a ser atingido na sexta-feira, excepto nas estações do Lavradio, Escavadeira e Cascais cujo pico é atingido na quarta e na quinta-feira, respectivamente.

Analizou-se o perfil médio diário das concentrações para o período em estudo e por estação do ano nos Olivais e na Av. de Liberdade (Figura 21 a) e b)). Efectuou-se a comparação com a Av. de Liberdade, por se ter verificado que mesmo a dos Olivais, considerada uma estação urbana de fundo, apresenta dois picos diários que correspondem às horas de maior tráfego da manhã e no final da tarde. Verifica-se, como era de esperar, que esses picos são mais bem demarcados na Av. da Liberdade (CCDR-LVT, 2005). Este comportamento é observável independentemente da estação do ano, não obstante, se verificar nos Olivais, no Outono, um desfasamento de uma hora no primeiro pico e no Verão existirem dois picos no fim do dia intercalados com uma descida às 19 horas.

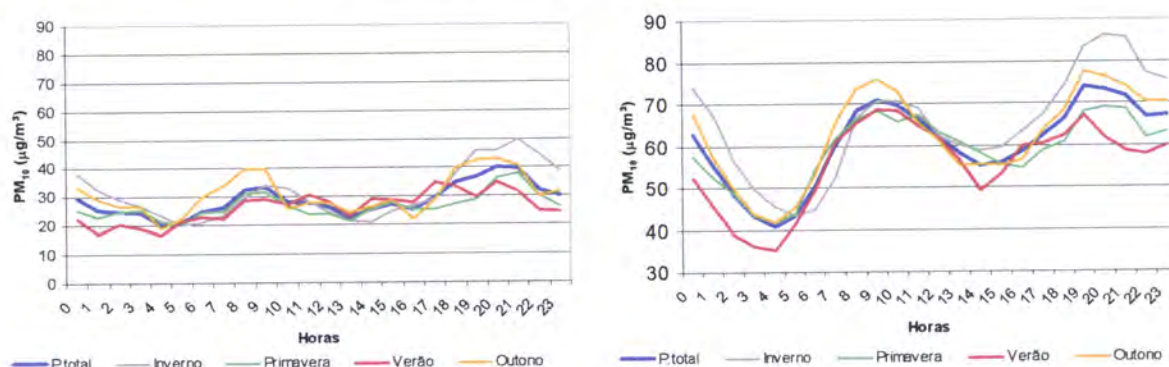


Figura 21 - Perfil médio diário das concentrações para o período em estudo e por estação do ano nas estações a) Olivais e b) Av. da Liberdade, referente ao período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

4.2 Análise à influência da meteorologia nas concentrações de partículas inaláveis - PM10

Analizou-se para este período de cerca de 4 anos e meio os dias em que as concentrações excederam os valores limite em pelos menos 3 estações e identificaram-se os episódios de poluição (com a duração de pelo menos 2 dias).

No período considerado (Julho de 1999 a Dezembro de 2003) foram identificados 83 episódios de poluição, num total de 358 dias, com concentrações superiores ao valor legislado. A Figura 22 permite-nos concluir que 57% dos episódios duram de 2 a 4 dias.

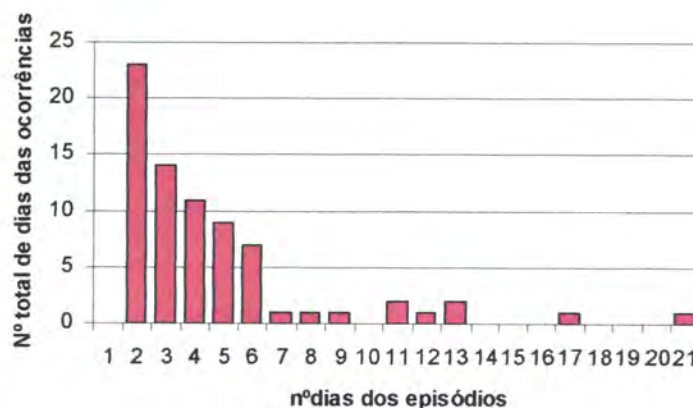


Figura 22 - Histograma da distribuição pelo nº de dias dos episódios

Analizou-se a frequência mensal com que ocorreram esses episódios (Figura 23). Verifica-se que:

- ocorreram menos episódios no mês de Abril e mais episódios nos meses de Setembro e Março;
- existe uma certa analogia ao comparar-se com a Figura 15 referente às concentrações médias registadas na estação dos Olivais no período todo.



Figura 23 - Frequência da ocorrência mensal de episódios de poluição, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Na Figura 24 apresenta-se a frequência da ocorrência desses episódios por estação do ano. Verifica-se que ocorreu no referido período mais episódios no Outono e menos episódios na Primavera.

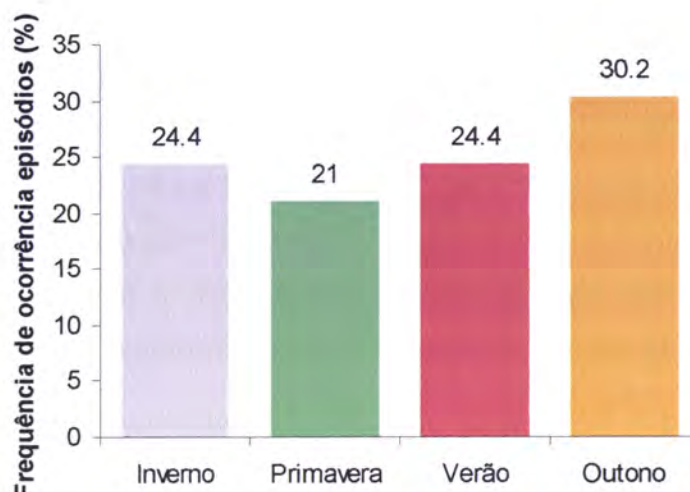


Figura 24 - Frequência de ocorrência de episódios de poluição, por estação do ano, no período de Julho de 1999 a Dezembro de 2003

Associou-se os episódios de poluição às situações sinópticas respectivas, com base em cartas de superfície (análise das 12 UTC) do modelo global do Centro Europeu (ECMWF), e criou-se, de uma forma subjectiva, 6 situações ou classes, considerando o fim a que se destinava (qualidade do ar) (Tabela 4). A sexta classe, denominada de transição, foi criada para as situações em que seria difícil caracterizar sinopticamente o episódio (exemplo: em 2 dias de episódio, num dia predomina o anticiclone, no segundo dia passa uma frente).

Tabela 4 – Classes de situação sinóptica

Classe	Situação sinóptica à superfície
SS1	Anticiclone+depressão de origem térmica na Península Ibérica (d.o.t)
SS2	Anticiclone + vale depressionário do Norte de África
SS3	Anticiclone ou crista anticiclónica
SS4	Depressões ou vales depressionários
SS5	Superfície frontal
SS6	Situação meteorológica de transição

É importante acrescentar que na classe sinóptica SS3 incluem-se as situações em que o anticiclone está localizado na Península Ibérica (PI) e portanto não há

gradiente de pressão ou que dependendo da localização do anticiclone a circulação para Portugal:

- é do quadrante leste, ou seja há influência de uma massa de ar continental;
- é do quadrante oeste ou de norte, e portanto recebe a influência de uma massa de ar marítima.

Na classe sinóptica SS4 incluem-se as depressões baroclínicas e barotrópicas. Realce-se que os seus efeitos em termos de dispersão atmosférica são determinados pela categoria anterior, pela localização do centro da depressão face ao continente, ou neste caso mais especificamente em relação à região de Lisboa, e pela sua actividade que está interligada com os dois pontos anteriores.

Refira-se ainda que a situação sinóptica SS1 foi isolada por ocorrer praticamente numa época específica (Verão). Esta situação sinóptica também ocorreu no Outono, no mês de Setembro.

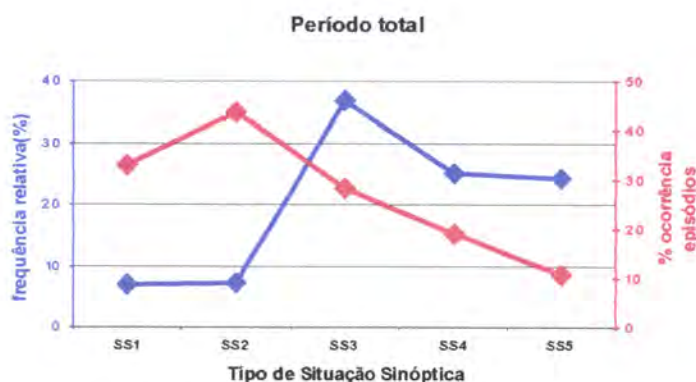


Figura 25 – Frequência relativa de situações sinópticas e percentagem de ocorrência dos episódios em relação ao número total de dias para cada tipo de situação sinóptica, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Apresenta-se na Figura 25 a frequência relativa com que ocorreram as situações sinópticas acima mencionadas (curva azul), bem como a percentagem de vezes que ocorreram os episódios relativamente a todos os dias de cada situação sinóptica (curva vermelha). Constata-se que:

- a situação sinóptica que ocorreu, neste período de quatro anos, com maior frequência é a que está associada a um anticiclone à superfície (SS3);.

- as situações sinópticas SS2 e SS1 ocorreram poucas vezes, mas a percentagem com que ocorre um episódio associado a essas situações é significativa (44 e 33 %, respectivamente).

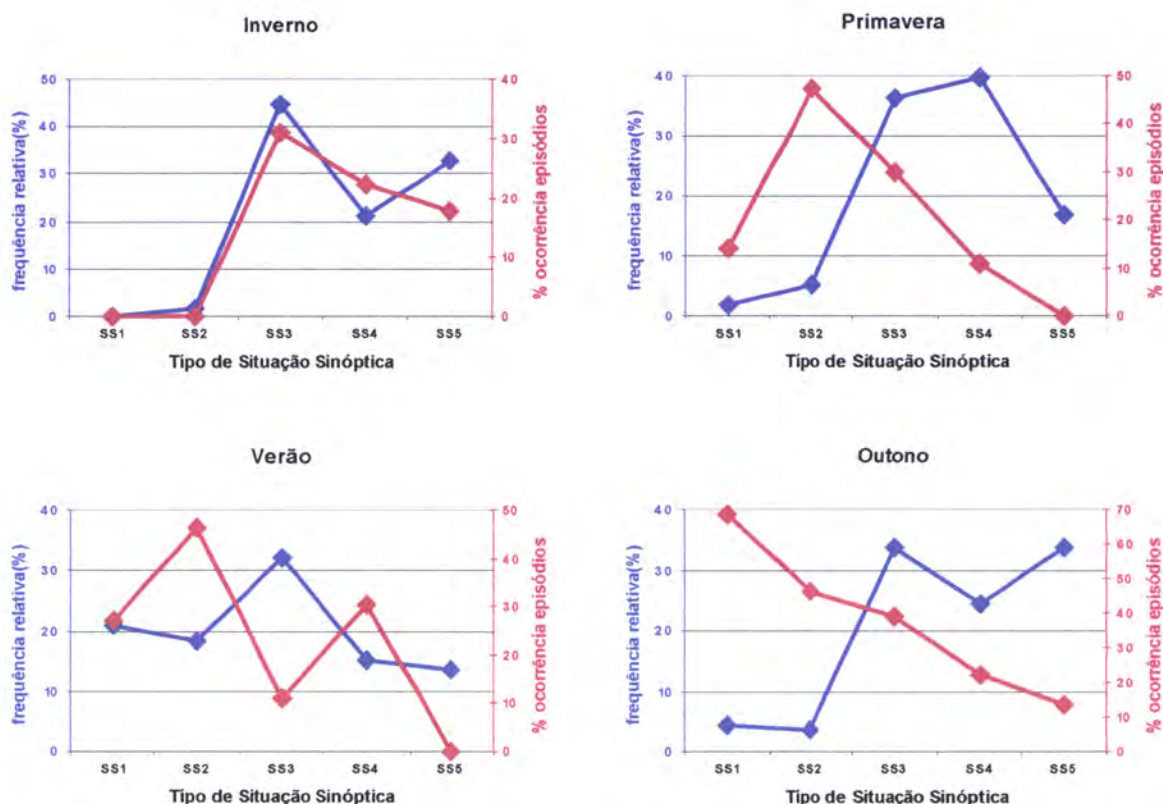


Figura 26 - Frequência relativa de situações sinópticas e percentagem de ocorrência de dias de episódios em relação ao número total de dias para cada tipo de situação sinóptica, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003, por estações do ano

Na Figura 26 apresenta-se o mesmo tipo de análise, por estação do ano. Consta-se que:

- excepto na Primavera, a situação sinóptica associada a um anticiclone à superfície (SS3) é a que ocorre com mais frequência;
- no Inverno a maior percentagem de episódios está associado a um anticiclone à superfície (SS3);
- na Primavera a situação sinóptica que ocorre com maior frequência é a que está associada a uma depressão à superfície (SS4), mas origina uma percentagem pequena de episódios;

- as situações sinópticas associadas a um vale que se estende do Norte de África (SS2) e a uma depressão de origem térmica (SS1) ocorrem mais no Verão, e a percentagem com que se verifica um episódio nessas situações é de 46 e 27 %, respectivamente.
- no Verão a existência de um anticiclone à superfície (SS3) origina uma percentagem baixa de episódios;
- no Outono a probabilidade de ocorrer um episódio quando há uma depressão de origem térmica à superfície (SS1) é de 70 %. Refira-se no entanto que foi de 1 a 20 de Setembro de 2001 que se concentraram os casos em que existiu uma depressão de origem térmica à superfície. Estas concentrações elevadas devem-se naturalmente ao facto da brisa ser menos intensa nesta estação do ano, uma vez que o aquecimento no interior da PI também é menor;

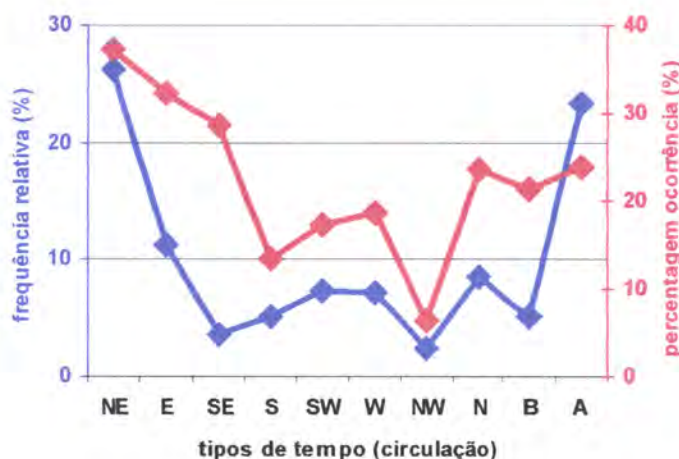


Figura 27 – Frequência relativa dos tipos de tempo e percentagem de ocorrência de dias de episódios em relação ao número total de dias para cada tipo de tempo, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Para este período foi ainda utilizado uma segunda classificação sinóptica Figura 27. Esta classificação é determinada de forma automática usando diversos pontos de pressão à superfície das análises do ECMWF (Mendes et al., 2002; Trigo e Da Câmara, 2000). Utiliza dez tipos de tempo, sendo oito deles direccionais e os outros dois de carácter puramente rotacional em que B é a depressão e A anticiclone. Nestes casos rotacionais a localização do centro de acção situa-se sobre o nosso território. Verifica-se que segundo esta classificação a maior frequência de episódios

de partículas está associada a circulação do quadrante leste (NE, E, SE), seguida dos tipos de tempo (norte, anticiclone e depressão). Os tipos de tempo de circulação NE, E e N estão englobados na classificação subjectiva anterior SS3 (anticiclone). A circulação de SE está incluída na situação SS2 ou na SS4.

Esta classificação engloba a informação da Figura 25 e da Figura 32 apresentando a vantagem de reduzir a subjectividade e de ser mais prática uma vez que para períodos climatológicos mais longos a primeira classificação torna-se extremamente morosa. A limitação da utilização das classificações subjectivas em termos operacionais já foi apontada por diversos autores e citada por Kassomenos *et al*, 2003.

Associando as situações sinóticas subjectivas à concentração de partículas (Figura 28), verifica-se que:

- a situação sinótica à qual está associada maior concentração de PM é a situação SS2.
- a situação sinótica SS5 é a que está associada a concentrações mais baixas.

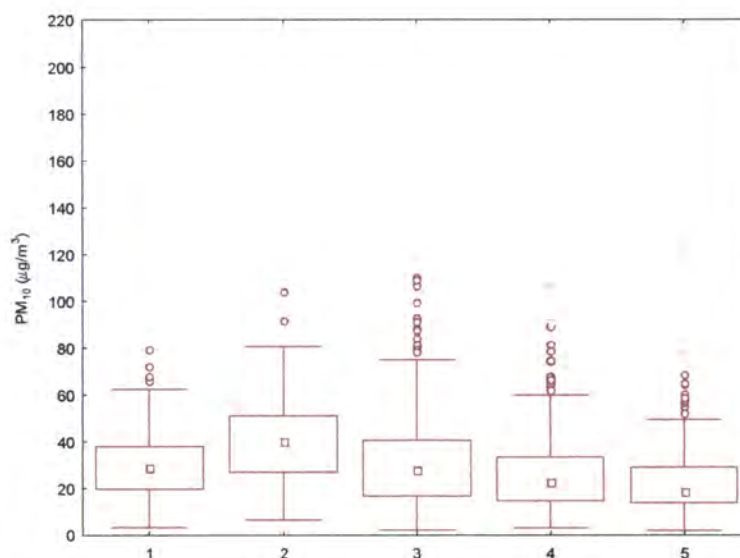


Figura 28 - Gráfico de caixas das concentrações de PM₁₀ associadas aos diferentes tipos de situações sinóticas, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Analisou-se o comportamento da altura da camada de mistura, dada a sua relevância na dispersão de poluentes na camada limite planetária. A leitura da Figura 29 permite-nos concluir que a mediana é da mesma ordem para a situação sinótica

SS2 e SS4, mas na presença da situação sinóptica SS2 a altura máxima de camada de mistura é mais elevada. A SS1 apresenta uma mediana baixa. Um estudo efectuado em Madrid (1991-1992) que teve por objectivo associar determinadas situações sinópticas a alturas de camada de mistura identificou a maior camada de mistura (3000 m) com uma depressão de origem térmica (sondagem efectuada durante a existência das condições de depressão térmica) (Crespi *et al*, 1995). Acrescente-se que este estudo não incluía a situação sinóptica 2.

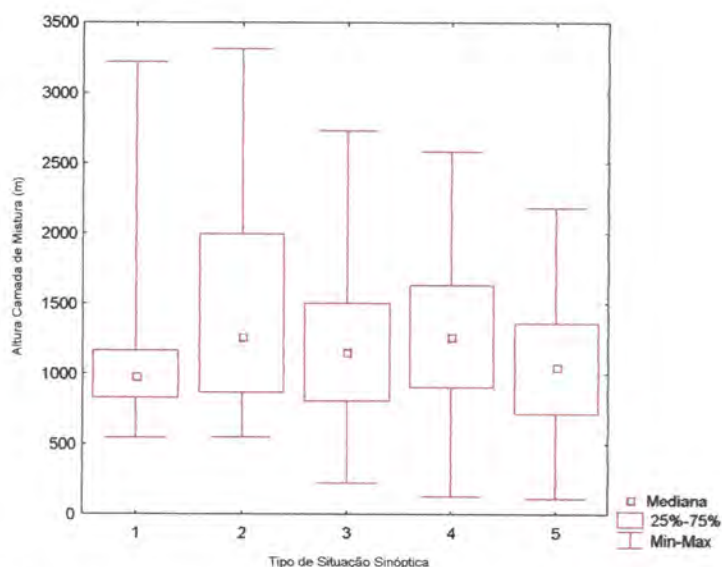


Figura 29 – Gráfico de caixas da estimativa da altura máxima da camada de mistura (Holzworth, 1967) associada a cada tipo de situação sinóptica, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Como se esperava, a altura da camada de mistura é menor no Inverno (Figura 30). O valor da mediana mais elevado é referente ao mês de Abril e o mais baixo em Dezembro. O mês de Abril é o mês em que se verificam grandes movimentos verticais, pelo facto da temperatura à superfície ser já elevada e em altitude ser baixa, consequentemente os fenómenos de convecção são traduzidos por um aumento da altura da camada de mistura.

Analisando o comportamento de PM_{10} com a altura da camada de mistura (Figura 31) observa-se que as concentrações mais baixas estão associadas a uma altura de camada de mistura entre 1500 e 2000 m. Uma altura da camada de mistura de cerca de 500 m está associada a concentrações um pouco mais altas (mediana de $30 \mu g/m^3$) devido naturalmente às menores condições para a dispersão. Destaca-se o

facto da mediana mais elevada (cerca de $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ser observada com uma camada de mistura entre os 3000 e os 3500 m, podendo estas situações estar associadas à situação de vale invertido desde o Norte de África, corroborando os resultados da Figura 29.

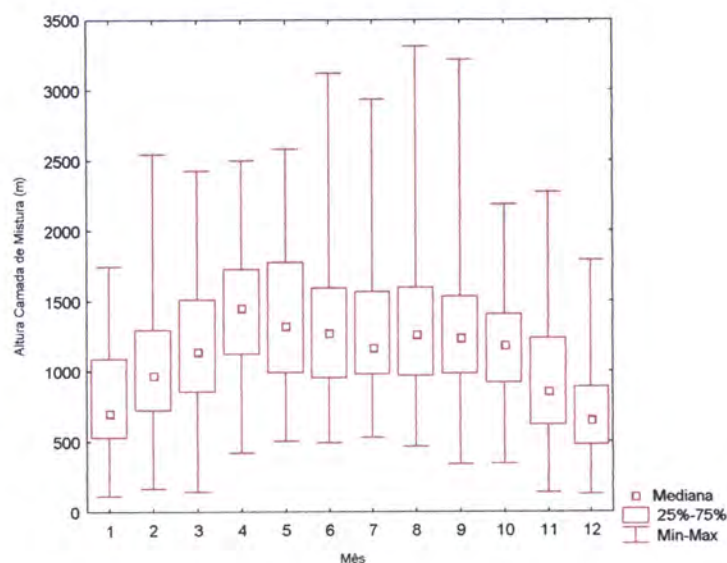


Figura 30 – Gráfico de caixas da altura da camada de mistura, por mês, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

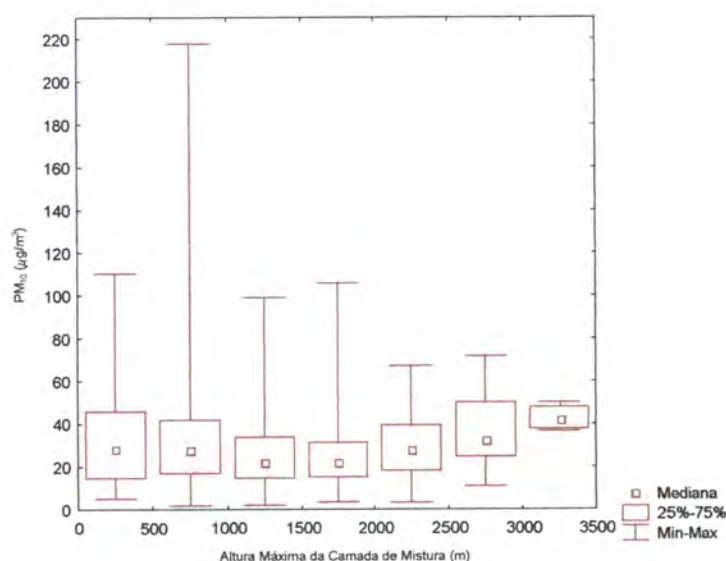


Figura 31 – Gráfico de caixas da concentração de PM_{10} versus altura da camada de mistura, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Analisou-se a variação dos valores horários da concentração de PM_{10} medidos nos Olivais com os valores horários do rumo do vento registado na estação de Lisboa

Gago Coutinho, no período de Julho de 1999 a Novembro de 2003 (Figura 32). Observa-se que a maior concentração de PM_{10} está associada à ausência de vento (calma) e a vento do quadrante leste, o que comparando com a Figura 25 inclui a situação sinóptica à superfície SS3, SS2 e por vezes a SS4.

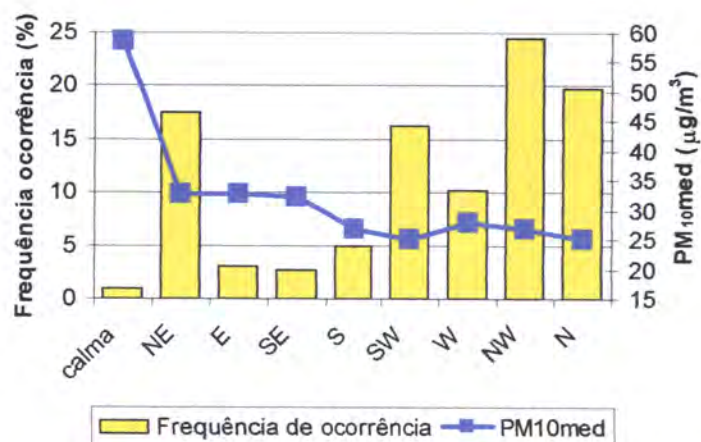


Figura 32 - Concentração média de PM_{10} (estação dos Olivais) versus frequência de ocorrência do rumo do vento

Efectuou-se uma análise descritiva básica às componentes zonal e meridional do vento e comparando a variação mensal de cada uma das variáveis com a de PM_{10} , verifica-se que:

- de Abril a Agosto 25 a 75 % da componente zonal do vento é positiva, ou seja ocorre vento do quadrante oeste nesta percentagem de tempo;
- a componente de leste ocorre mais nos meses de Inverno;
- a mediana da componente meridional do vento é ao longo do ano negativa, o que revela uma frequência mais elevada de vento norte, sendo de pelo menos 75 % de Maio a Agosto;
- a conjugação dos 2 gráficos (componente zonal e meridional) permite constatar que o vento de Maio a Agosto é de noroeste.

Consequentemente face ao comportamento das concentrações de PM_{10} (Figura 23 e Figura 33), poder-se-á afirmar que de Abril a Julho as concentrações são mais baixas associadas a um vento predominante de noroeste.

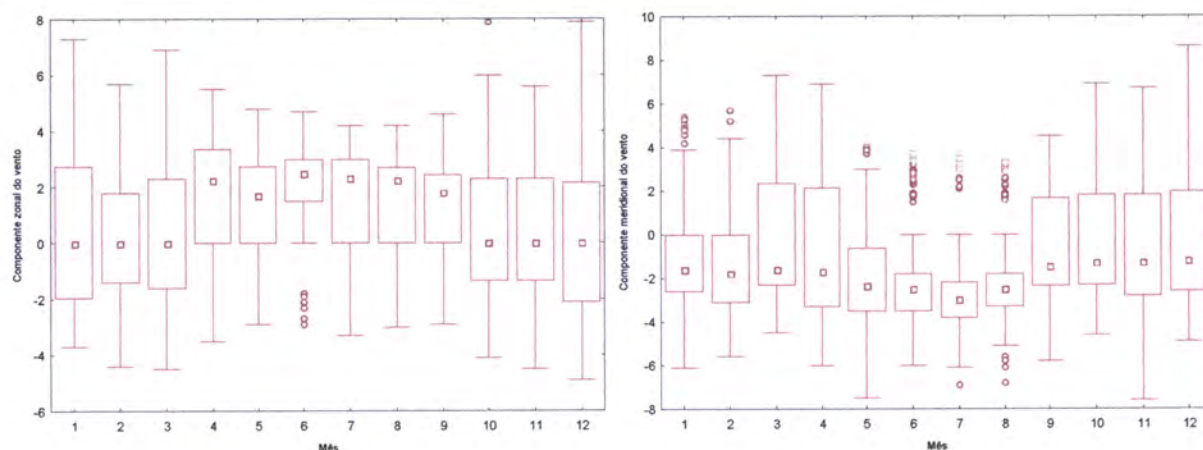


Figura 33 – Gráficos de caixas, por mês, referentes aos valores da a) componente zonal e b) meridional do vento, na estação de Lisboa Gago Coutinho, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

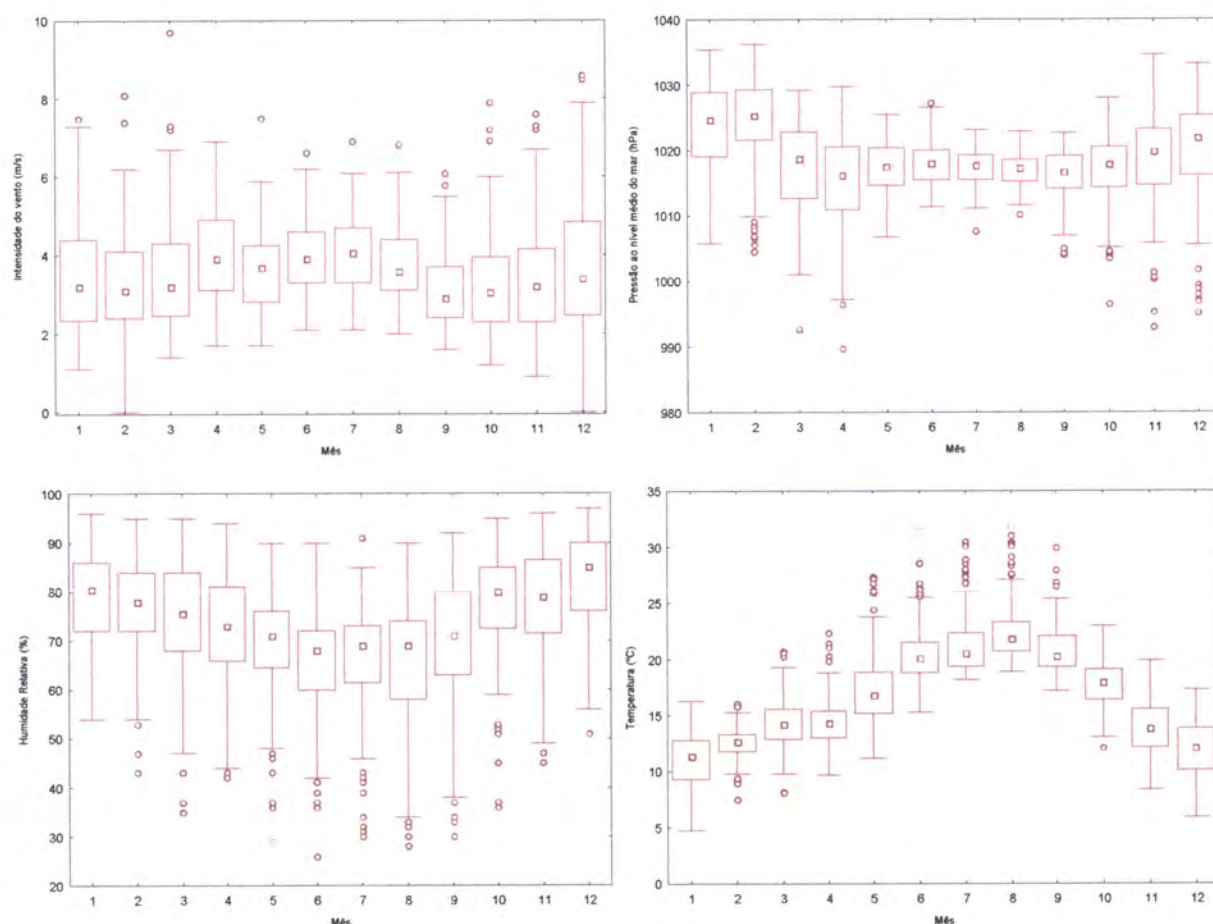


Figura 34 – Gráficos de caixas, por mês, referentes aos valores da a) intensidade do vento, b) pressão ao nível médio do mar, c) humidade relativa e d) temperatura do ar, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

A Figura 34 apresenta o comportamento da intensidade do vento, da pressão atmosférica, humidade relativa e temperatura. Da análise do gráfico referente à intensidade do vento verifica-se que a mediana da velocidade do vento é maior no Verão, apresentando um menor grau de variabilidade relativamente aos meses de Inverno. A variação da humidade relativa ao longo do ano é a esperada, realçando no entanto o facto do mês de Junho apresentar a mediana mais baixa do Verão. A temperatura também apresenta uma variação típica, em que a mediana mais alta é observada no mês de Agosto. O valor da mediana da pressão mais baixo é observado no mês de Abril.

Para poder efectuar uma analogia destes parâmetros meteorológicos com a variação da concentração de PM_{10} , apresenta-se a Figura 35. A análise desta figura permite adicionar em termos de informação relativamente à Figura 15 o seguinte:

- existe uma maior variabilidade de concentração e com valores mais elevados de PM_{10} nos meses de Inverno;
- na sequência da leitura da Figura 15 os meses de Setembro e Março apresentam valores de concentração elevados (50 a 75 % dos valores de concentração mais elevados ocorreram nestes meses).

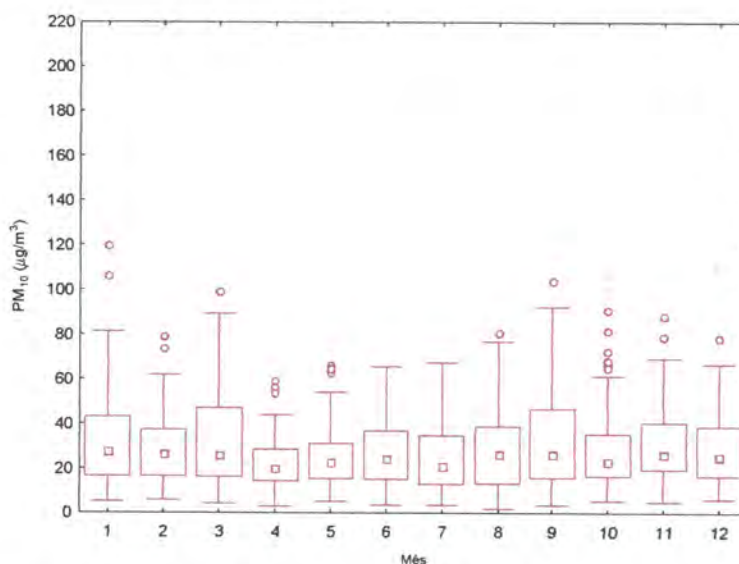


Figura 35 – Gráficos de caixa, por mês, referentes aos valores de concentração de PM_{10} , registados na estação dos Olivais, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003

Efectuou-se a correlação entre os valores médios diários da concentração de PM_{10} da estação dos Olivais com as seguintes variáveis meteorológicas:

- superfície: temperatura do ar, pressão atmosférica, humidade relativa; vento (intensidade e rumo e/ou componentes uu e vv);
- altitude: temperatura e humidade relativa do ar (700,850 e 925 hPa).

Uma vez que os resultados obtidos com a regressão linear não foram satisfatórios, optou-se por não os apresentar. O coeficiente de determinação (R^2) mais elevado obtido foi de 0.2528 com a variável intensidade do vento. Os restantes resultados do modelo foram inferiores a 10 % da variância explicada.

Foi igualmente efectuada uma análise de regressão linear múltipla, de forma a avaliar quantitativamente a influência de cada variável para a concentração de PM_{10} . Utilizou-se como variável dependente a concentração de PM_{10} e como variáveis independentes as seguintes variáveis meteorológicas adimensionadas: as variáveis anteriores, a situação sinóptica à superfície, a altura do geopotencial (1000, 850, 700 e 500 hPa) e a altura máxima da camada de mistura. O modelo construído apresenta os coeficientes mencionados na Tabela 5. A variância explicada pelo modelo é relativamente baixa (39%, $r^2 = 0.39$), mas o modelo é considerado válido (a probabilidade associada ao coeficiente de regressão é superior a um nível de significância de 0.05). Verifica-se que as variáveis com maior peso são a temperatura aos 925 hPa e o geopotencial aos 500 hPa.

Tabela 5 – Coeficientes do modelo de regressão linear múltipla

Variável	Coeficiente
Temperatura	-0.459
Humidade Relativa	-0.307
Quantidade Precipitação	-0.068
Intensidade Vento	-0.336
Componente Meridional Vento	0.229
Altura Máxima Camada Mistura	-0.134
Altura Geopotencial 850hPa	0.421
Altura Geopotencial 500hPa	-0.606
Temperatura 925hPa	0.809
Humidade Relativa 925hPa	0.167
Humidade Relativa 850hPa	-0.182
Humidade Relativa 700hPa	-0.076

Utilizando outro método de análise estatística (análise de regressão em árvore) observa-se que a variável com maior peso é a velocidade do vento, seguido da

humidade relativa aos 850 e 925 hPa e num patamar inferior a altura da camada de mistura e a componente zonal do vento (Figura 36).

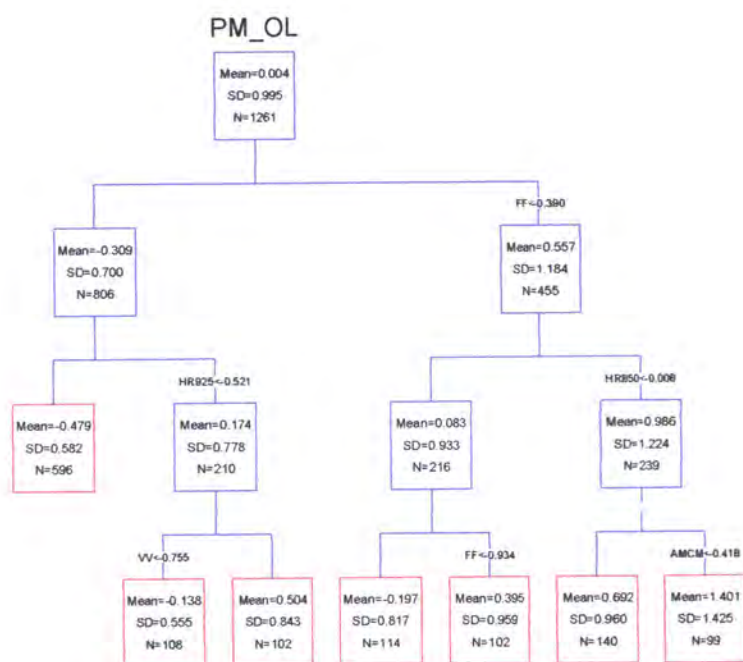


Figura 36 – Resultados obtidos com a aplicação do modelo CART

Por último avaliou-se a contribuição das variáveis meteorológicas na concentração de partículas à superfície pela técnica da análise de componentes principais. Foram identificados 3 factores que explicam 74 % da variância observada (Tabela 6).

Tabela 6 – Total da variância explicada

Valores	Valor próprio	% variância total	Valor próprio acumulado	% acumulada
1	1.788	29.804	1.788	29.804
2	1.587	26.445	3.375	56.249
3	1.082	18.035	4.457	74.284

Elaborou-se a matriz das componentes para obter a correlação entre as variáveis e os principais factores extraídos. As correlações obtidas com esta matriz foram muito próximas umas das outras, de forma que se procedeu à rotação varimax de forma a maximizar a correlação de cada factor com cada parâmetro observado. Ou seja na análise em componentes principais identifica-se deste modo o factor (ou componente principal).

Na Tabela 7 apresentam-se os novos resultados. Uma vez que as variáveis a que correspondem os pesos mais elevados estão correlacionadas entre si, constata-se que:

- a componente principal 1 baseada nas variáveis meteorológicas explica 29 % da variabilidade do fenómeno, em que a temperatura do ar e a humidade relativa apresentam o maior peso e um comportamento oposto.
- a componente principal 2 que poderá ser um indicador da concentração de PM_{10} à superfície está associada ao vento, em que a velocidade do vento representa a maior contribuição, seguido da componente zonal do vento.

**Tabela 7 – Matriz de componentes da ACP com rotação
varimax normalizada**

	Factor1	Factor2	Factor3
Temperatura	0.867	-0.016	0.108
Humidade Relativa	-0.844	0.012	0.352
Intensidade Vento	0.251	-0.779	0.152
Componente Zonal Vento	0.199	-0.491	0.671
Componente Meridional Vento	-0.233	0.144	0.826
PM10	0.304	0.746	0.158
Variância explicada	1.714	1.427	1.316
Percentagem total	0.286	0.238	0.219

4.2.1 Análise meteorológica sinóptica, de mesoscala e local aos episódios

Os episódios foram analisados ao nível das escalas acima mencionadas de uma forma descendente até se conseguir reproduzir o cenário meteorológico que ocorreu no período em análise.

4.2.1.1 Episódio de 5 a 8 de Novembro de 1999

Este episódio foi associado à situação sinóptica 3 (anticiclone à superfície) com circulação de leste. Segundo um estudo efectuado por Almeida (2004) as massas de ar continentais (sobretudo continental sul) originam em Lisboa concentrações mais elevadas de partículas oriundas do solo.

Este episódio caracterizou-se pelo aumento das concentrações de PM₁₀ até dia 6 (excepto na Av. da Liberdade cujo pico é atingido no dia 5), com ultrapassagem do valor limite nas quatro estações nos dias 5 e 6 (sexta-feira e sábado), por um decréscimo a 7 (interrupção do episódio) e por um aumento com excedências no dia 8 (conforme se pode ver na Figura 47 no capítulo referente à análise meteorológica local).

4.2.1.1.1 *Análise Meteorológica Sinóptica*

A análise sinóptica baseia-se nos campos do modelo ECMWF. No dia 4 a situação meteorológica era caracterizada por um anticiclone localizado na Europa Central e que se estendia em crista até à Península Ibérica e para o Norte de África. Uma depressão complexa, cujo núcleo principal estava centrado na Islândia, que se prolongava em vale até às Canárias, originou no seu movimento para sueste o deslocamento do anticiclone. No dia 5 formou-se uma depressão *cut-off* entre os Açores e as Canárias e a depressão acima referida passou pelo Norte da Península Ibérica em direcção ao Mediterrâneo (Figura 37). No dia 6 a depressão *cut-off* enche e está centrada nos Açores, a outra começa a cavar e o anticiclone passa a estar localizado no Golfo da Biscaia estendendo-se em crista para o Norte de África. Esta situação altera-se no dia 8. A depressão no Mediterrâneo começa a encher e o anticiclone passa a estar localizado mais para norte com um eixo mais zonal, passando Portugal a estar novamente influenciado por uma massa de ar vinda do interior do Continente Europeu (Figura 38).

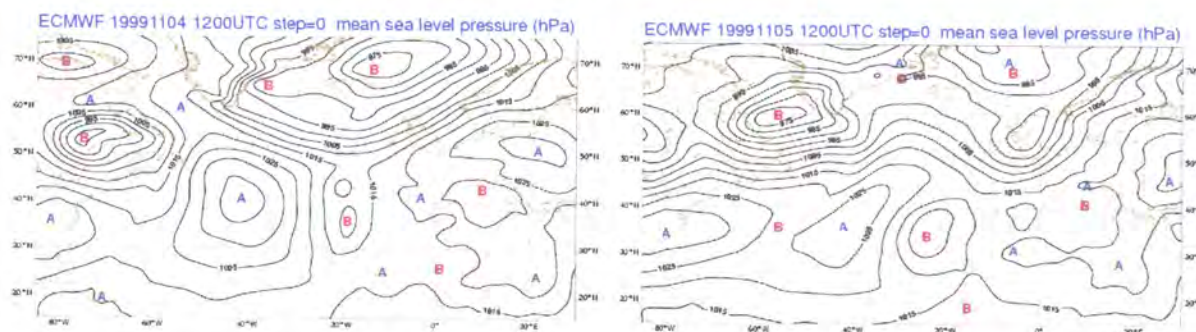


Figura 37 - - Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF), a) dia 4 e b) dia 5 de Novembro de 1999 (12UTC)

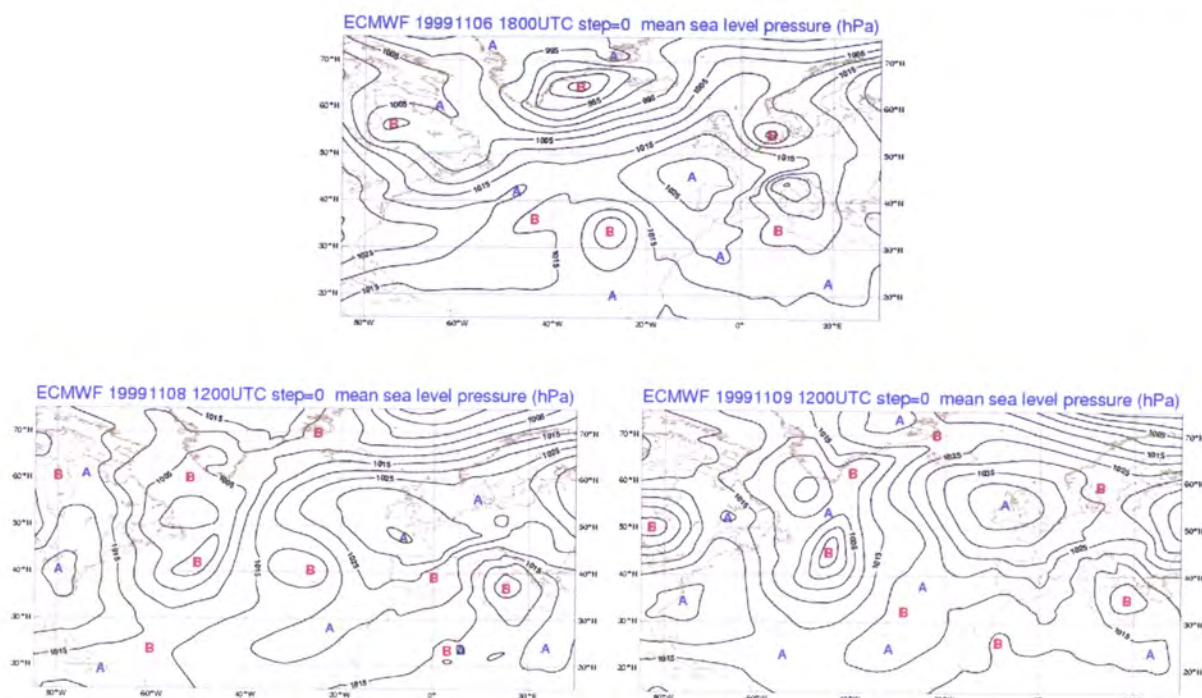


Figura 38 – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF), a) dia 6, 18UTC; b) dia 8, 12UTC e c) dia 9 (12 UTC) de Novembro de 1999

Aos 500 hPa manteve-se uma crista em Portugal Continental (Figura 39) durante todo o período.

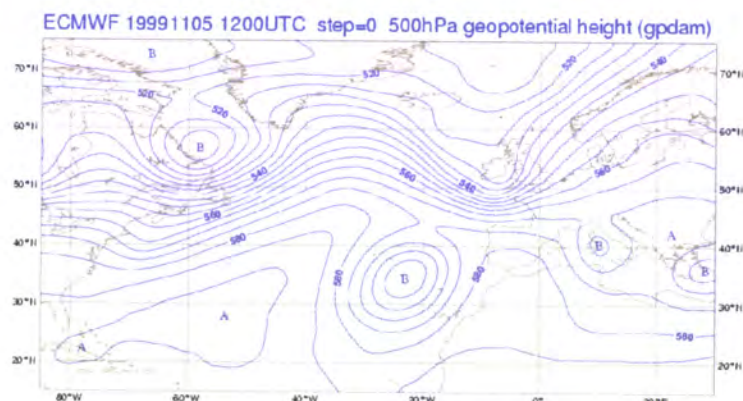


Figura 39 - Análise do campo do geopotencial aos 500 hPa (ECMWF), 5 de Novembro de 1999 (12 UTC)

Aos 850 hPa, observa-se no dia 4 uma região de altas pressões desde a Escandinávia ao Norte de África (Figura 40 a)).

A partir de dia 5, devido ao deslocamento da depressão acima referida para o Mediterrâneo, o núcleo anticiclónico do Norte de África vai-se deslocando e

estendendo mais para norte e Portugal passa a estar influenciado, a este nível, por uma massa de ar transportada na circulação deste núcleo e da depressão existente entre os Açores e as Canárias (Figura 40 b)).

No dia 6 a circulação no Atlântico é maior (Figura 40 c)).

No dia 8 o anticiclone está no Golfo da Biscaia e no dia 9 nas Ilhas Britânicas, originando para Portugal uma circulação do interior da Europa (Figura 40 e) e f)).

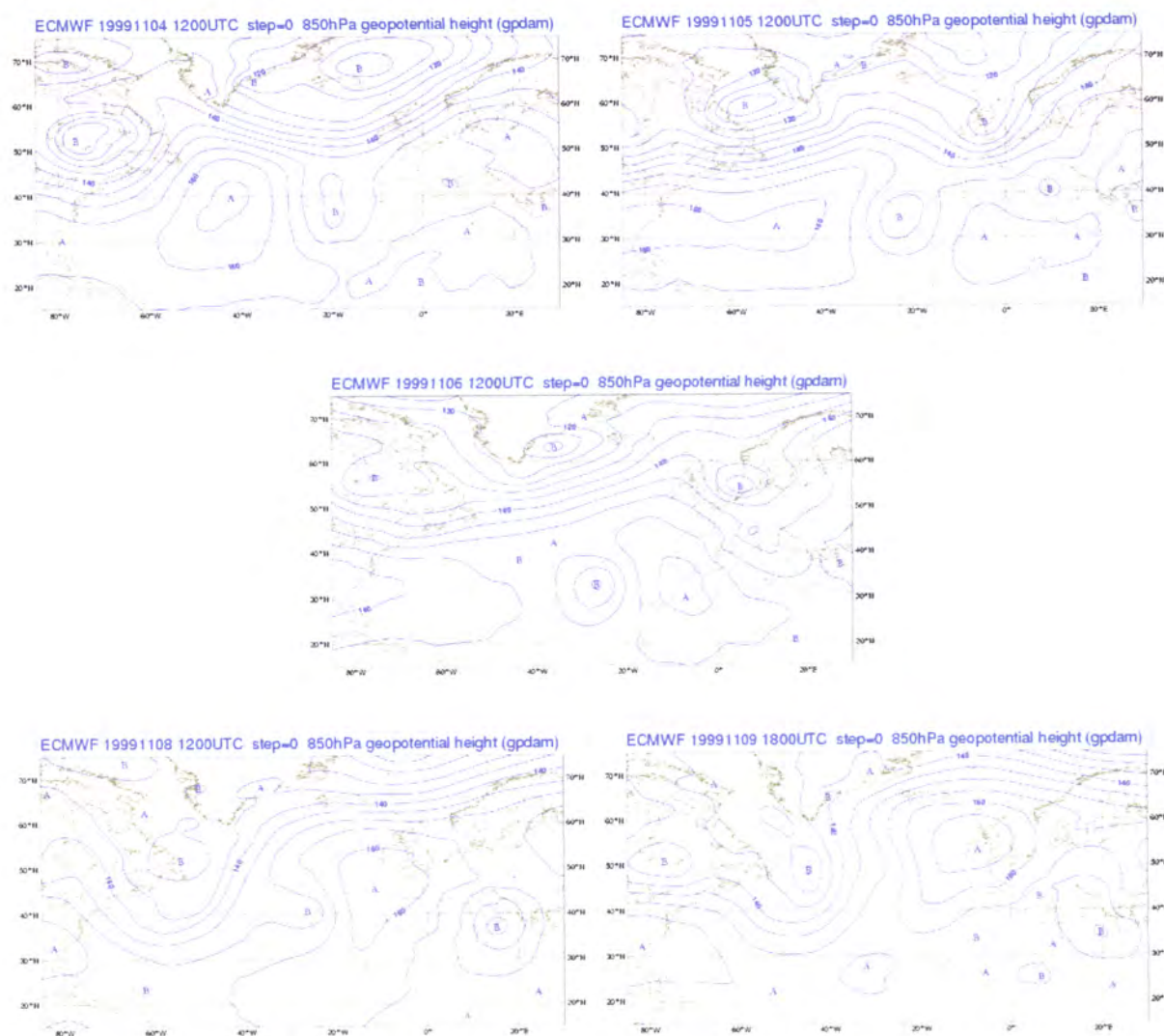


Figura 40 - Análise do campo do geopotencial aos 850 hPa (ECMWF) a) 4; b) 5; c) 6; d) 8; e) 9 (12 UTC) de Novembro de 1999

Aos 700 hPa, a situação é, ao longo deste período, idêntica.

Analisando os campos da temperatura aos 1000 hPa identifica-se no dia 4 uma intrusão de ar mais frio na Península Ibérica vinda do interior do Continente Europeu, que embora mais atenuada acaba por se manter até dia 5, sendo nesse dia

substituída por uma massa de ar mais quente. A análise aos 850 hPa permite-nos identificar essa massa de ar como vinda do Norte de África (na circulação da acção conjunta da depressão no Atlântico e do anticiclone no Norte de África) (ver anexo). No dia 7, esta circulação começa a retrair-se pela intrusão de ar mais frio do continente europeu que se mantém no dia 8 e é reforçada no dia 9 (ver anexo). Quando se analisam os campos de advecção da temperatura aos 925 e 850 hPa destaca-se a advecção negativa de temperatura no dia 4 às 00 UTC oriunda do interior do continente europeu, uma advecção positiva de temperatura no dia 5 vinda do Atlântico e uma advecção negativa de temperatura de 6 a 9 no interior da Península Ibérica que aos 850 hPa é oriunda do continente europeu (ver anexo).

Há sempre advecção de humidade vinda do Atlântico e que é mais significativa no dia 8 aos 925 hPa. No dia 5, fim de dia 4 e início de 6 é advectada da depressão da região das Canárias.

4.2.1.1.2 *Análise de trajectórias*

Foram efectuadas retro-trajectórias da partícula, com base no modelo KNMI, que chega aos níveis 700,850,925 e 1000 hPa à zona de Lisboa, resumidas na tabela A1 (em anexo).

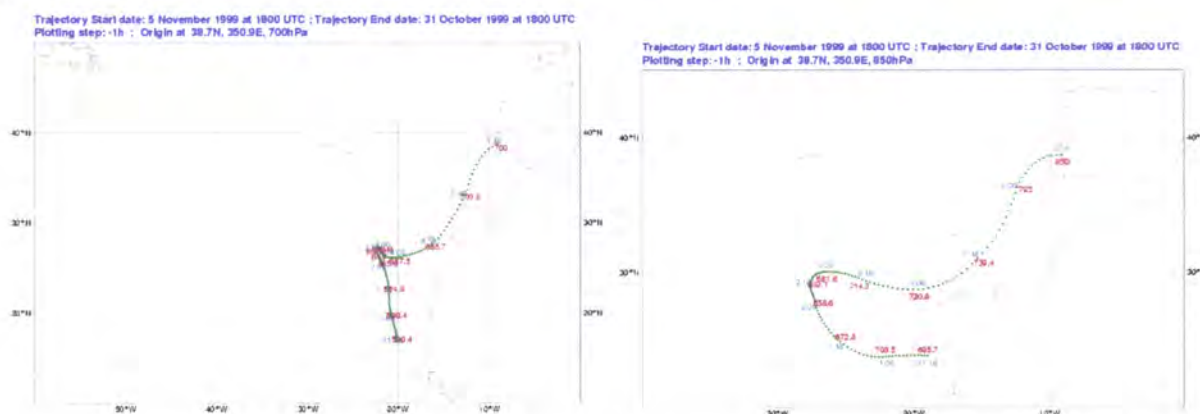


Figura 41 – Retro-trajectórias que chegam no dia 5 (18 UTC) aos níveis 700 e 850 hPa aos Olivais

Dos resultados encontrados destaca-se o facto das trajectórias referentes aos dias de chegada 5, 6 e 7, ao nível 700 e 850 hPa, serem de origem tropical (marítima ou continental africana) e apresentarem o mesmo trajecto final: passam nas Canárias, a leste da Madeira e entram na Península Ibérica directamente para o local de chegada (ver Figura 41 a Figura 43). Destas, apenas as que chegam no dia 6 ao nível 700 hPa

e no dia 7 aos 850 hPa têm origem no continente africano, propriamente dito. Ao nível 925 hPa, nos dias 6 e 7 a massa de ar com origem no Atlântico também efectua um trajecto final pelas Canárias e Madeira.

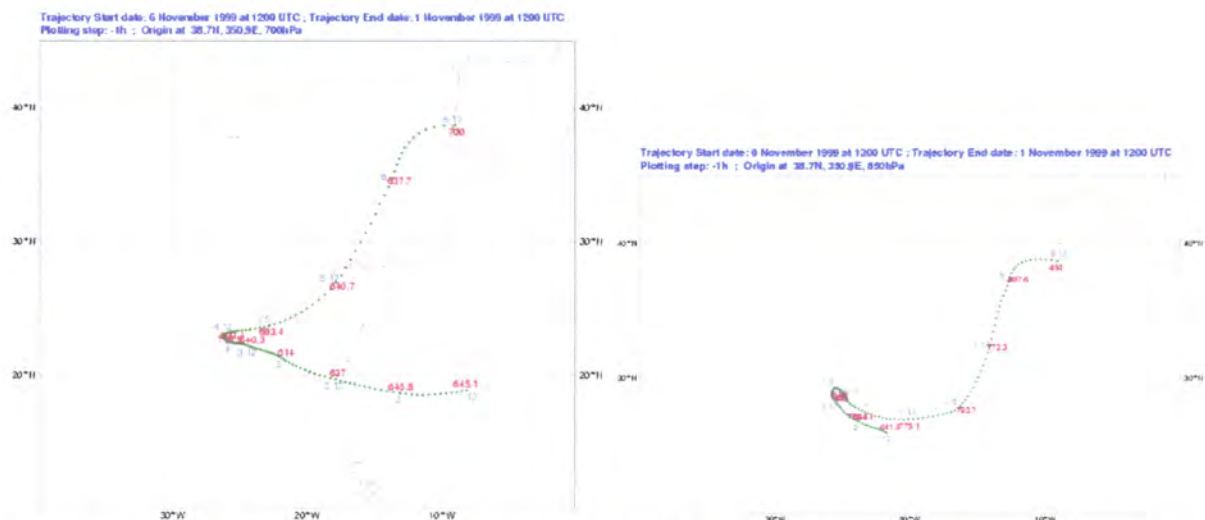


Figura 42 – Retro-trajectórias que chegam no dia 6 (12 UTC) ao nível 700 e 850 hPa aos Olivais

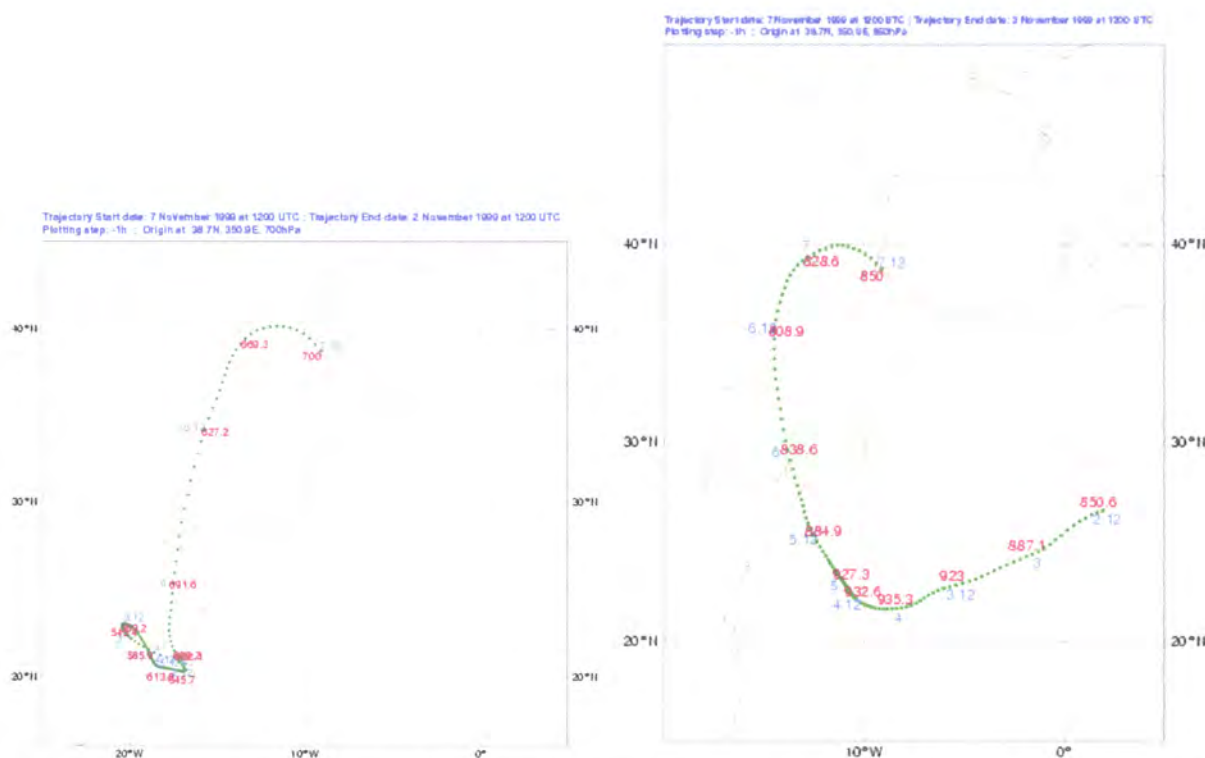


Figura 43 – Retro-trajectórias que chegam no dia 7(12 UTC) ao nível 700 e 850 hPa aos Olivais

A massa de ar que chega no dia 8 aos 850 hPa tem origem e características diferentes da dos dias anteriores (tabela em anexo), apesar de ainda passar pelas Canárias (Figura 44 b). A que chega aos 700 hPa parte do Atlântico a oeste do Saara

Ocidental e tem um percurso de quarenta e tal horas em África, fazendo no final o percurso das retro-trajectórias anteriores (Figura 44 a).

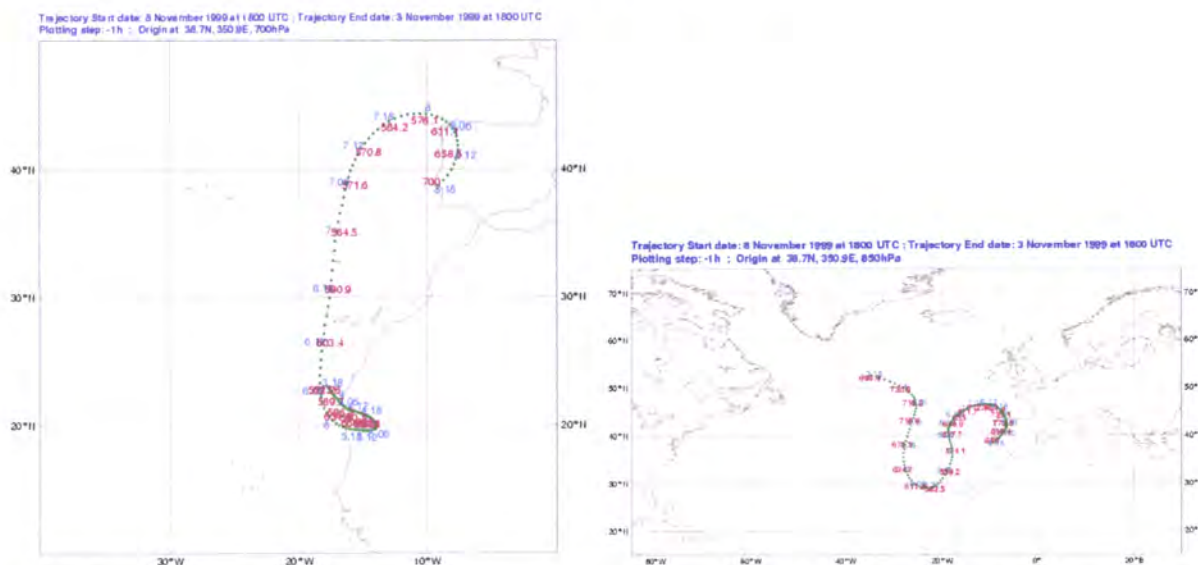


Figura 44 – Retro-trajectórias que chegam no dia 8 (18 UTC) a) ao nível 700 e b) 850 hPa aos Olivais

Nos dias 4 e 9 a massa de ar é de origem atlântica, modificada, tendo um percurso final continental significativo.

4.2.1.1.3 Análise Meteorológica local

A análise à escala local foi efectuada com base em dados meteorológicos de altitude (sondagem aerológica das 0 e 12 UTC) e de superfície da estação de Lisboa Gago Coutinho e dados de PM₁₀, NO_x e SO₂ das estações da rede de qualidade do ar.

4.2.1.1.3.1 Observações meteorológicas de altitude (Sondagens aerológicas)

As sondagens aerológicas, traduzidas no diagrama seguinte (tefigrama), permitem obter informação sobre o estado termodinâmico da atmosfera.

No período em análise verifica-se sempre estabilidade às 0 UTC. Às 12 UTC existe sempre uma camada instável à superfície (a camada instável mais elevada é a que se verifica no dia 6 e que é cerca de 600 m).

Destaca-se o facto da atmosfera estar condicionalmente instável no dia 5 e de existir uma camada isentrópica entre os 720 e os 700 hPa (2900 e 3100 m), com uma temperatura potencial de 35 °C e uma razão de mistura entre 1,2 e 2 g/kg. Acima

desta, tal como é típico numa camada com características de massa de ar do Norte de África (Carlson e Prospero 1972), existe uma camada de inversão (ver Figura 45).

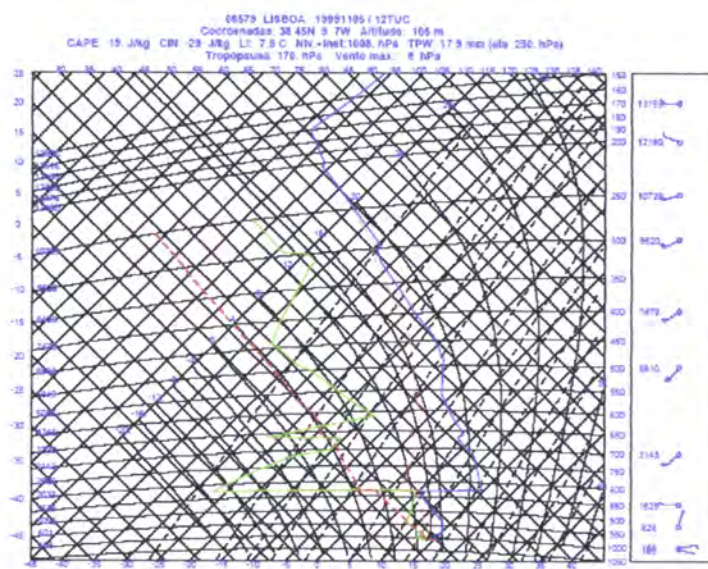


Figura 45 – Tefograma referente à sondagem aerológicas realizadas na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 5 de Novembro de 1999, 12 UTC

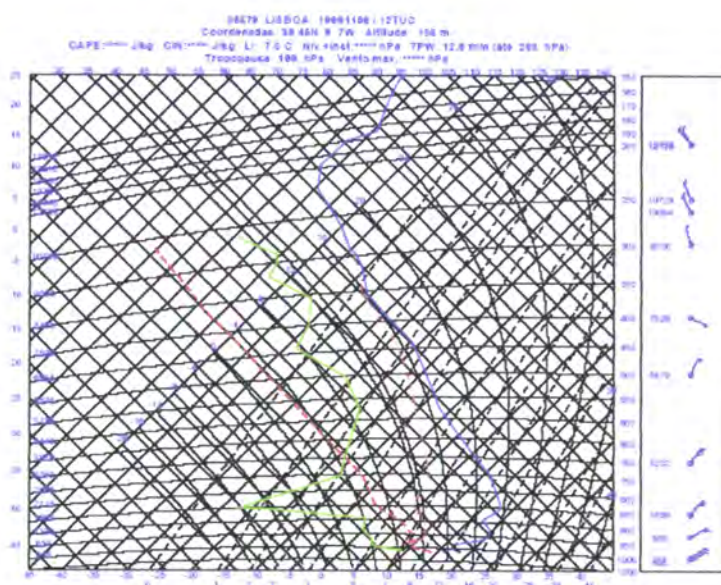


Figura 46 – Tefograma referente à sondagem aerológicas realizadas na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 8 de Novembro de 1999, 12 UTC

Verifica-se que a atmosfera vai ficando mais seca a níveis cada vez mais baixos. No dia 6 a atmosfera está muito seca a partir dos 890 hPa, no dia 7 aos 980 hPa, no dia

8 aos 950 hPa e no dia 9 à superfície. Esta camada de ar mais seca, apresenta uma temperatura potencial baixa (ver exemplo na Figura 46).

4.2.1.1.3.2 Observações Meteorológicas de superfície

Conforme foi mencionado no início do capítulo (4.2.2), este episódio caracterizou-se pelo aumento das concentrações até dia 6 (excepto na Av. da Liberdade), por um decréscimo a 7 e por um novo aumento no dia 8 (mantém na Av. da Liberdade) (Figura 47).

Destaca-se ainda:

- valores mais elevados de PM na estação da Av. da Liberdade;
- o facto do comportamento das curvas das estações Olivais, Entrecampos e Lavradio ser semelhante apenas nos primeiros dias, porque nos dias 8 e 9 as concentrações no Lavradio aumentam significativamente (especialmente no dia 9), de uma forma muito irregular.

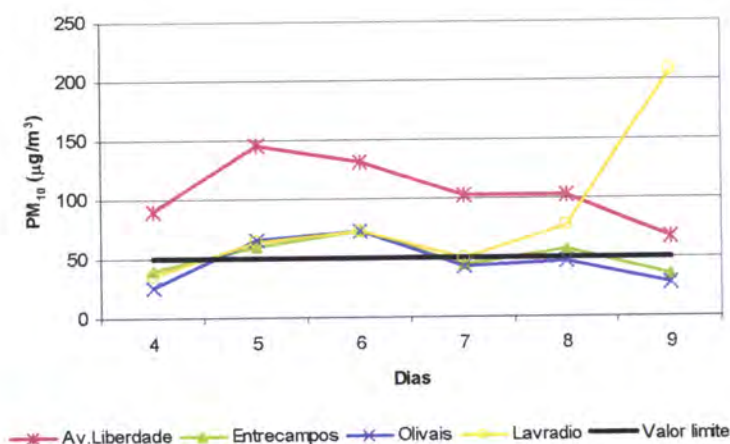


Figura 47 - Concentrações médias diárias de PM₁₀ registadas nas estações da Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de 4 a 9 de Novembro de 1999

Na Figura 48 que representa a variação horária das concentrações observa-se um aumento das concentrações ao longo do dia 5, com um pico que varia entre as 21 e as 23 UTC.

Segue-se uma diminuição até às 5/6 UTC, depois sobe ligeiramente (pico às 12 UTC), diminui até às 14 UTC e depois durante 24 horas as estações de Entrecampos, Olivais e Lavradio mantiveram a mesma gama de valores, voltando a aumentar das

13 às 21 UTC de dia 7. No dia 8 observa-se um ciclo semelhante ao típico de tráfego (ver Figura 21), com um pico às 9 e outro às 21 UTC (excepto a estação do Lavradio que apresenta um comportamento irregular a partir das 21 UTC deste dia).

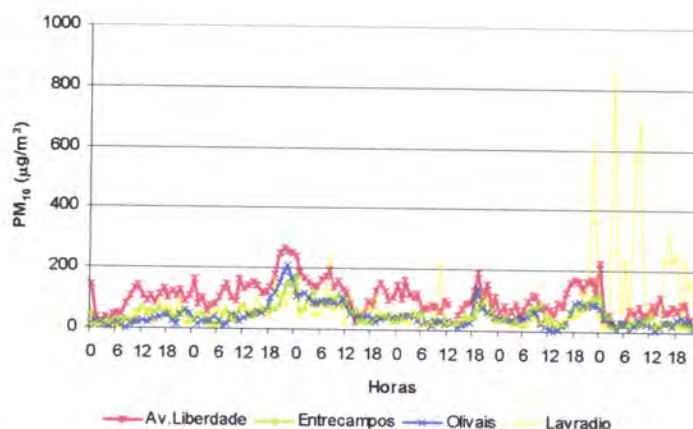


Figura 48 – Concentrações médias horárias de PM_{10} registadas nas estações da Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de 4 a 9 de Novembro de 1999.

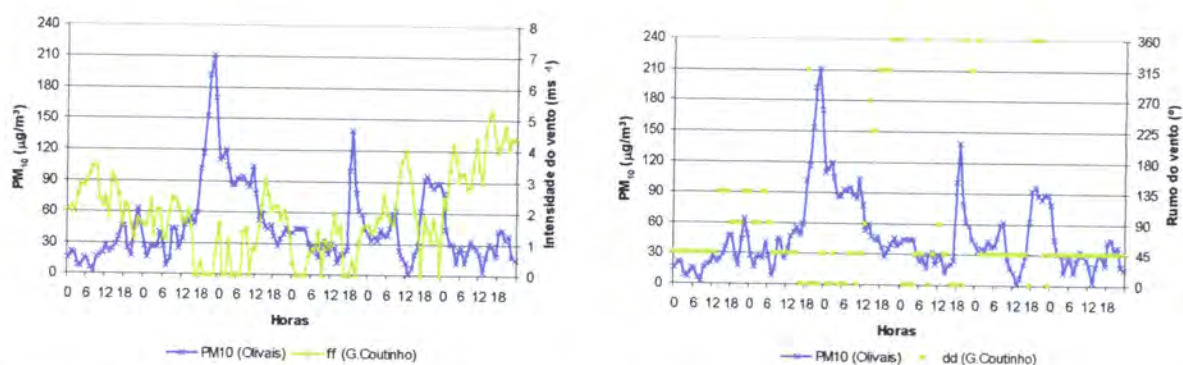


Figura 49 – Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM_{10} registados na estação dos Olivais, 4 a 9 de Novembro de 1999

A análise da Figura 49 permite inferir uma relação inversa entre a velocidade do vento e as concentrações de PM_{10} . Destacando-se o facto de no início do dia 4 e no dia 9 as concentrações terem sido baixas e a intensidade do vento mais elevada e nos picos dos dias 5 e 7 a velocidade do vento ser mais baixa, intercalando com períodos de calma. Seguidamente a velocidade aumenta (embora ainda estejamos a falar em vento inferior a 15 km/h, portanto fraco) e a concentração diminui. No dia 8 as concentrações são mais baixas das 8 às 13 UTC, e a velocidade do vento

aumenta. A seguir a velocidade do vento diminui até às 17 e o pico de concentração é atingido às 19 UTC.

Verifica-se que no início do dia 4, no dia 9 e das 9 às 13 UTC de dia 8 o vento é de nordeste. No início das subidas para os picos acima referidos o vento está de nordeste (pico de 5, 7 e 8), passando nos picos de 5 e 7 a períodos de calma. No dia 8 o vento está de nordeste no primeiro pico e de norte (intercalando com calma) no segundo. Quando as concentrações começam a descer, após os picos referidos, o vento passa a nordeste (dias 5 e 8) e norte (dia 7). No dia 6, o vento a partir das 14 UTC é de oeste/noroeste.

Analizou-se o comportamento do poluente NO_x na estação dos Olivais para confirmar se estamos na presença de poluição local devido a tráfego (Figura 50).

No dia 7 observa-se o aumento das concentrações a partir das 15 UTC, tal como para as partículas. E no dia 8 também se observam os picos da manhã e da tarde, embora mais ténues.

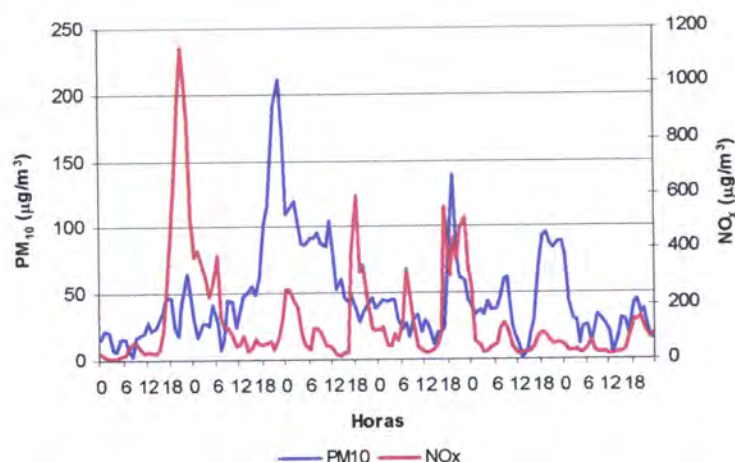


Figura 50 - Concentrações horárias de NO_x e de PM_{10} na estação dos Olivais, 4 a 9 de Novembro de 1999

Dado que, contrariamente às outras estações, no Lavradio as concentrações de PM_{10} aumentam no fim dos dias 8 e 9, optou-se por analisar o comportamento de outros gases (SO_2 e NO_x) nessa estação. O comportamento do SO_2 foi completamente dispar. Quanto ao NO_x (Figura 51) observam-se dois picos de NO_x (às 9 e 21 UTC).

Constata-se no entanto que a variação de PM_{10} tem oscilações exageradas e picos demasiado elevados para o expectável. Tal pode-se dever a um fenómeno local de

poluição cuja fonte pela simples análise dos dados não se consegue identificar ou por eventuais problemas no funcionamento do analisador, sendo que esta possibilidade à partida não foi considerada como provável pela CCDR-LVT, na medida em que validou os dados em causa.

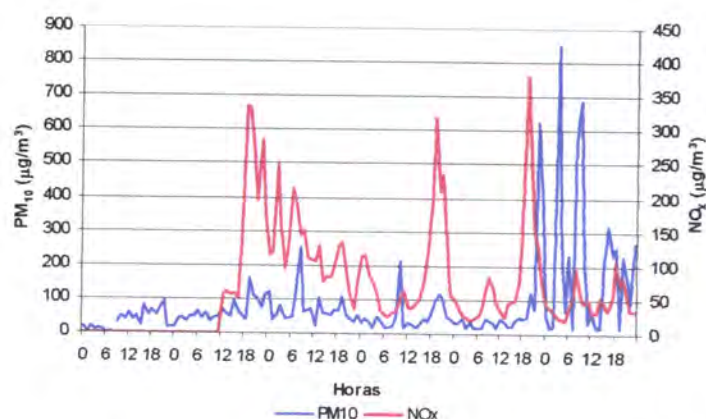


Figura 51 - Concentrações horárias de NO_x e de PM_{10} na estação do Lavradio, 4 a 9 de Novembro de 1999

4.2.1.1.4 *Resumo*

Este episódio foi escolhido por estar associado a um anticiclone à superfície, com circulação de leste para o continente.

As cartas do geopotencial aos 850 hPa do modelo ECMWF evidenciam uma circulação do Norte de África de 5 a 7. Os campos da temperatura aos 850 hPa e da advecção de temperatura e humidade aos diversos níveis indicam essa influência apenas a 5 e a 6.

As retro-trajectórias confirmam a influência de uma massa de ar com origem no continente africano apenas nos dias 6 (700 hPa) e 7 (850 hPa). No dia 5 é oriunda, a estes níveis, da região das Canárias ou de Cabo Verde. O tefigrama de dia 5 às 12 UTC mostra uma camada isentrópica entre os 720 e 700 hPa com características de uma massa de ar do Norte de África.

Deste modo, o aumento de concentrações de PM_{10} a 5 e 7 seria justificado por um incremento de PM_{10} do Norte de África, reforçado pelo facto da intensidade do vento ser baixa e se verificar mesmo calma quando se atingem os picos.

O facto de no dia 8 a massa de ar ser oriunda do continente europeu (leste) parece não ter interferido no aumento das concentrações de partículas.

O facto de se ter observado um comportamento do NO_x similar às partículas nos dias 7 e 8 nos Olivais e Lavradio, conduz a 2 considerações:

- o aumento de concentrações no dia 8 deverá ser de origem local, dado as curvas registadas nesse dia serem típicas de tráfego;
- o aumento de concentrações no dia 7 poderá ser de origem local e/ou do Norte de África.

Acrescente-se que ficou por justificar porque é que as concentrações foram mais baixas no dia 6, corroborando apenas o facto da camada instável à superfície, às 12 UTC, ser maior e do vento a partir das 14 UTC ser de oeste/ noroeste.

4.2.1.2 *Episódio de 26 a 28 de Fevereiro de 2000*

Este episódio foi associado à situação sinóptica 3 (anticiclone à superfície).

Estudou-se este período como o referente a um episódio, apesar de não se ter tido pelo menos dois dias seguidos com concentrações superiores ao valor limite (ver ponto 6 da metodologia (3.1)), porque as concentrações no dia 28 foram excepcionalmente altas e porque já tinha havido ultrapassagem do valor limite no dia 26.

De facto houve ultrapassagem do valor limite no dia 26 (sábado), houve um decréscimo no dia 27 em que apenas 2 estações ultrapassaram o valor limite, seguido de um aumento significativo a 28 e uma descida brusca a 29 (conforme se pode verificar na Figura 64).

4.2.1.2.1 *Análise Meteorológica Sinóptica*

A situação sinóptica à superfície, com base nas cartas do modelo ECMWF, caracterizou-se durante o episódio, por uma região de altas pressões praticamente estacionaria nas latitudes médias com um desenvolvimento leste/oeste desde a Europa Central à costa leste dos Estados Unidos da América. A norte e a sul desta região predominaram os centros de baixas pressões.

As correntes de jacto polar e subtropical associadas à circulação destes centros de baixas pressões deslocavam-se a norte e a sul da Península Ibérica (ver anexo).

Portugal Continental foi, deste modo, influenciado por um anticiclone localizado na Europa Central que se estendia em crista até ao Atlântico e Norte de África e por uma depressão centrada nas Canárias (Figura 52).

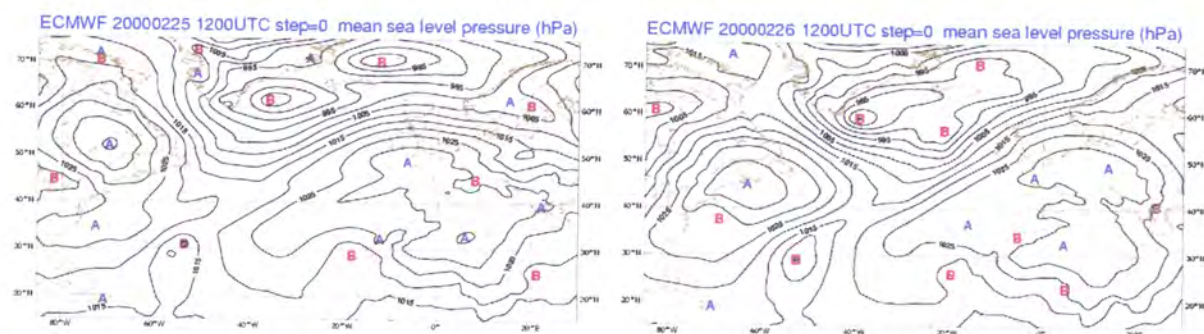


Figura 52 - Análise do campo da pressão ao nível médio domar (ECMWF), 25 e 26 de Fevereiro de 2000, 12 UTC

No dia 28 aproximou-se uma superfície frontal fria às regiões do Norte (Figura 53).

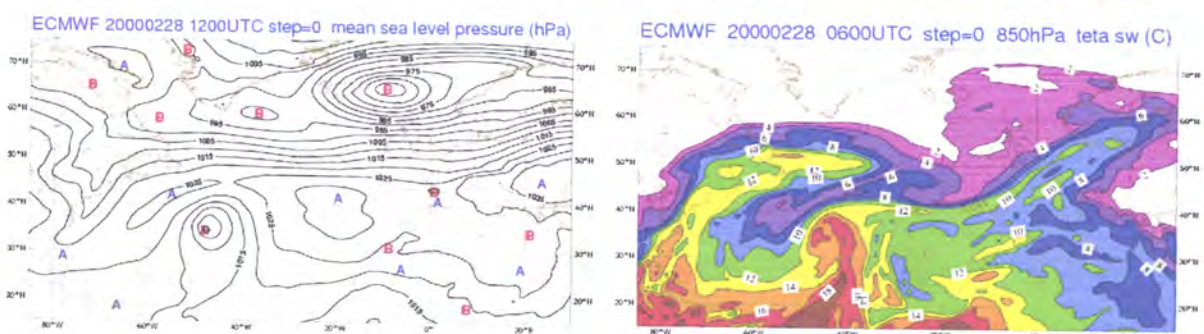


Figura 53 - Análise do campo da pressão ao nível médio do mar e da pseudo-temperatura potencial do termómetro molhado aos 850 hPa (ECMWF), 28 de Fevereiro de 2000, 12 e 06 UTC, respectivamente

Em altitude, recorrendo às cartas do geopotencial dos 500 mb, ao longo do período em estudo, destaca-se um vale quasi-estacionário na região das Canárias e uma crista que se estende desde o Saara ao Mar Báltico (Figura 54a).

No dia 28, devido à aproximação da depressão às Ilhas Britânicas, Portugal Continental ficou sob a influência de uma corrente de oeste, intensificou-se a crista na região dos Açores e o vale deslocou-se das Canárias para leste (Figura 54 b).

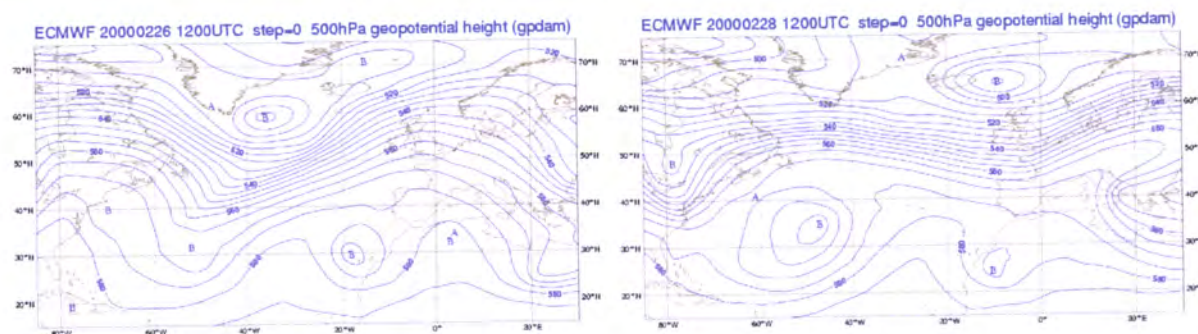


Figura 54 - Análise do campo do geopotencial aos 500 hPa (ECMWF), a) 26 e b) 28 de Fevereiro de 2000, 12 UTC

A análise à carta de geopotencial dos 850 mb induz que a massa de ar transportada pelo anticiclone continuamente modificada pela sua passagem no continente europeu e no continente africano circunda o centro depressionário existente nas Canárias e passa pelos Açores em direcção à Bretanha (Figura 55).

No dia 28, devido à passagem da superfície frontal a circulação para Portugal Continental é, tal como nos outros níveis, mais zonal.

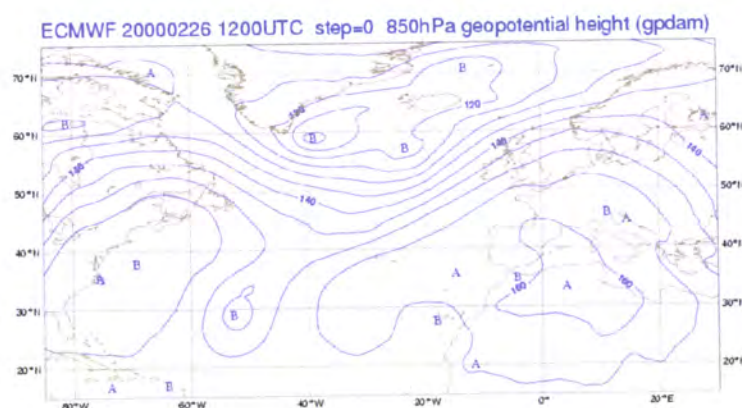


Figura 55 - Análise do campo do geopotencial aos 850 hPa (ECMWF), 26 de Fevereiro de 2000, 12 UTC

Aos 925 hPa, nada há a acrescentar, enquanto que aos 700 hPa o anticiclone desenvolve-se mais para sul, apresentando assim um maior trajecto pelo continente africano (Figura 56a).

No dia 29, dia seguinte a terminar o episódio de poluição, destaca-se o desaparecimento da depressão na região das Canárias devido à intensificação do

anticiclone dos Açores e a passagem, pelo Norte da Península Ibérica, de uma corrente perturbada de oeste associada à depressão (Figura 56b).

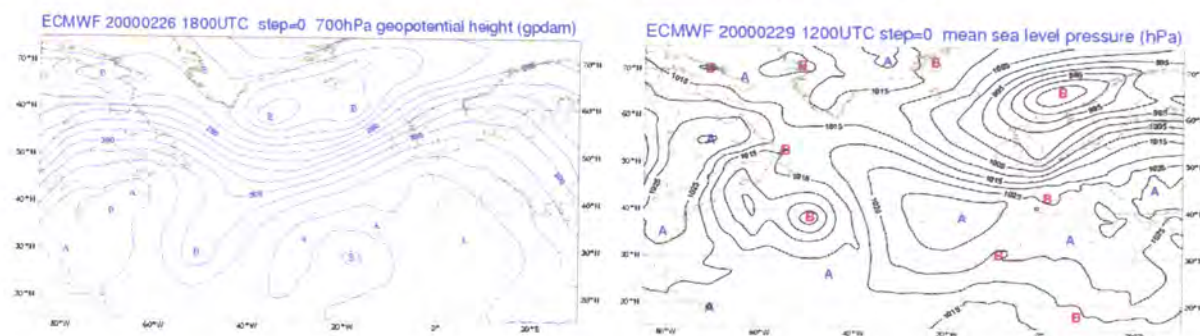


Figura 56 – - Análise dos campos do geopotencial a) aos 700 hPa (18 UTC) e b) ao nível médio do mar (12 UTC) (ECMWF), dos dias 26 e 29 de Fevereiro 2000

Observa-se uma mancha de temperaturas mais elevadas que se estende do Norte de África à Costa Sul do Algarve nos dias 25 e 26 aos 850 hPa e no dia 25 aos 700 hPa.

Analisando os campos referentes à advecção da humidade específica observa-se a partir de dia 26 e até ao início de 27 humidade advectada para Lisboa pela circulação conjunta do anticiclone e da depressão das Canárias (ver anexo). No dia 25 parece oriunda da depressão das Canárias. No dia 28 devido à passagem da frente verifica-se uma advecção negativa de humidade. No dia 29, a humidade que chega a Portugal é advectada também (ainda tem componente da circulação do Norte de África) do Atlântico Norte.

Quando se analisa o campo da humidade relativa do ar verifica-se que este parâmetro é sempre inferior a 70 % até ao fim do dia 27, excepto aos 500 hPa em que o sul de Portugal (onde se inclui Lisboa) apresenta, desde dia 25, valores superiores a 70 % de humidade transportada na circulação da depressão existente nas Canárias.

Relativamente ao campo advecção de temperatura, constata-se que a advecção para Portugal segue mais uma vez a partir de dia 26 a circulação do anticiclone (ver anexo), mas não é significativa, excepto no dia 28 em que há advecção de ar frio associado à frente. No dia 25, a advecção é mais pelo Sul da Península Ibérica associada à depressão nas Canárias.

4.2.1.2.2 Análise Meteorológica de Mesoscala

Este tipo de análise baseou-se nos campos do modelo ALADIN. Dado que não existia informação relativamente ao dia 26 (ficheiro danificado) foram analisados apenas os campos referentes aos restantes dias do episódio.

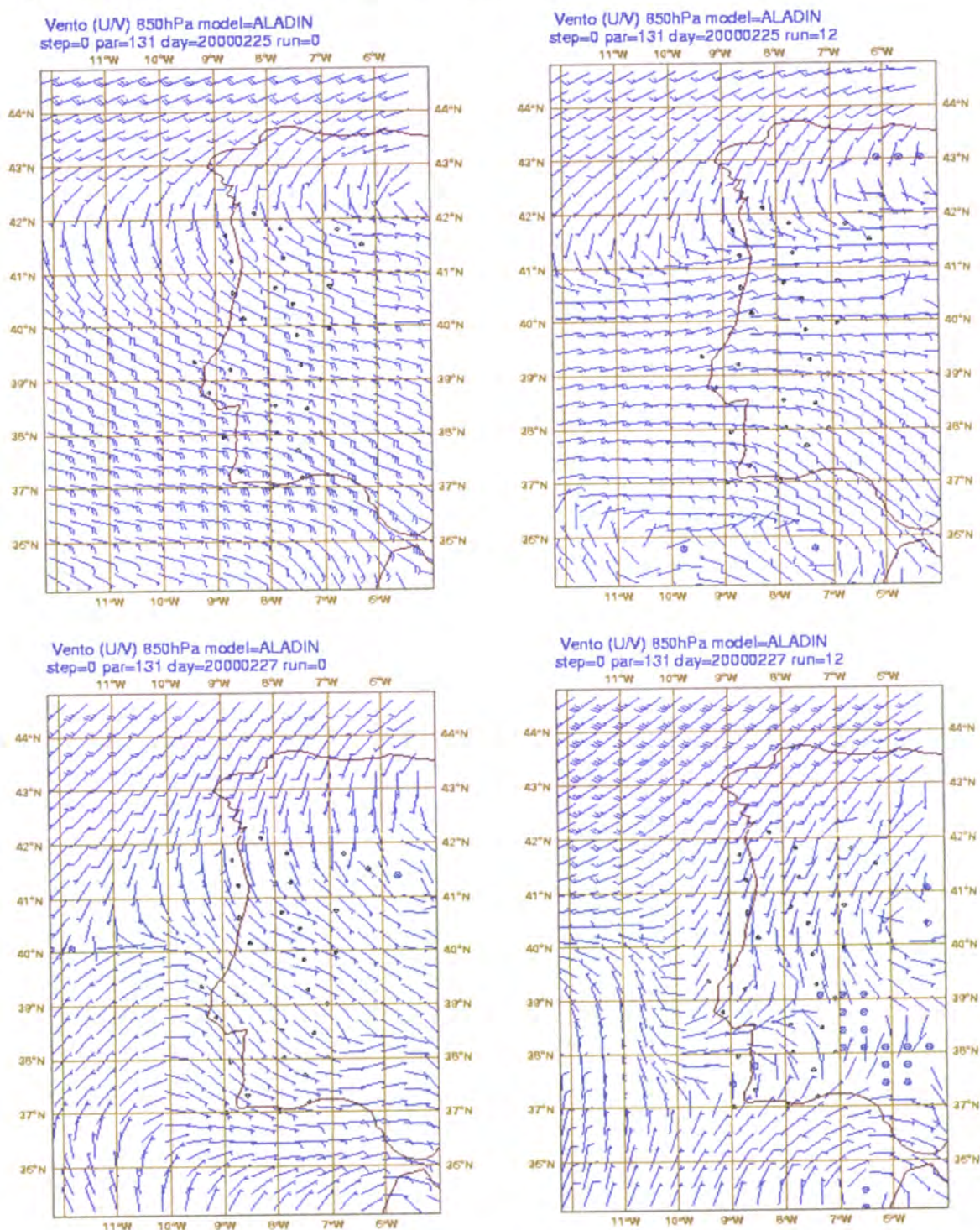


Figura 57 – Análise dos campos do geopotencial dos 850 hPa (ALADIN) do dia 25 (0 e 12 UTC) e 27 de Fevereiro de 2000 (0 e 12 UTC)

Relativamente ao campo do vento, verifica-se que, aos 850 hPa, no dia 25 o vento é do quadrante leste e diminui de intensidade às 12 UTC. No dia 27, às 0 UTC, o vento é de sueste e às 12 UTC já se nota a influência do Atlântico (Figura 57).

Relativamente à advecção de humidade específica, verifica-se tanto no dia 25 como no dia 27 uma insignificante advecção de humidade para Lisboa, que no dia 25 parece ser advectada do Atlântico às 0 UTC e de Gibraltar às 12 UTC e no dia 27 de Gibraltar (ver anexo).

No dia 25, observa-se advecção de temperatura pelo Sul da Península Ibérica ao nível 850 hPa, às 0 e às 12 UTC (ver anexo). No dia 27, observa-se advecção da temperatura, menos significativa, que parece vir de noroeste e de sul.

4.2.1.2.3 *Análise de trajectórias*

Foram efectuadas retro-trajectórias da partícula que chega aos níveis 700,850,925 e 1000 hPa à estação da qualidade do ar dos Olivais resumidas na tabela A2 (em anexo).

A massa de ar que chega no dia 25, às 18 UTC, tem a sua origem no dia 20 no Atlântico, e apresenta um trajecto no continente europeu relevante.

A partícula que chega no dia 26, às 12 UTC, aos 700 e 850 hPa, efectuou percurso em África (ver Figura 58).

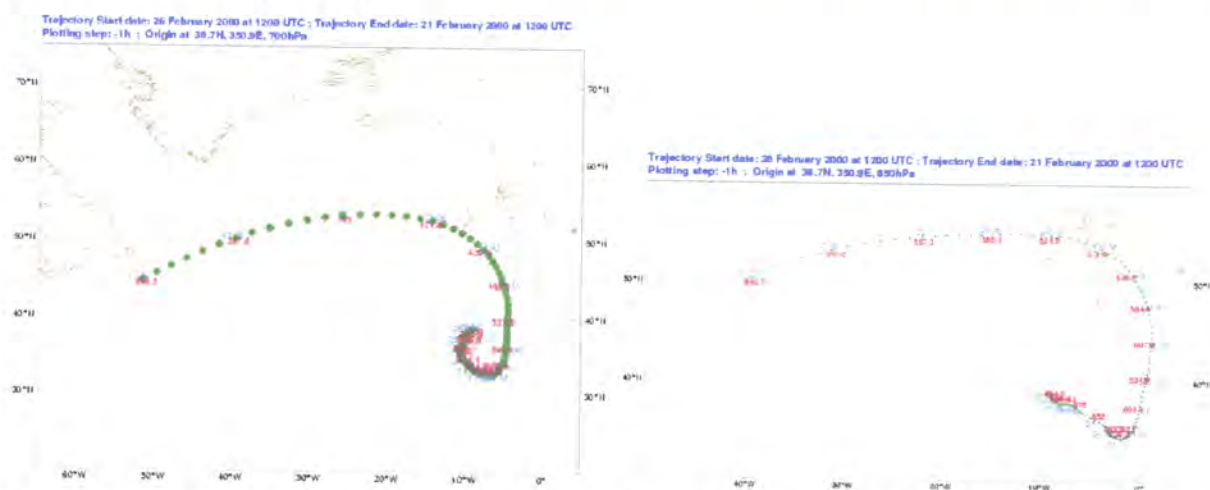


Figura 58 – Retro-trajectória que chega no dia 26 (12 UTC) aos níveis 700 e 850 hPa aos Olivais

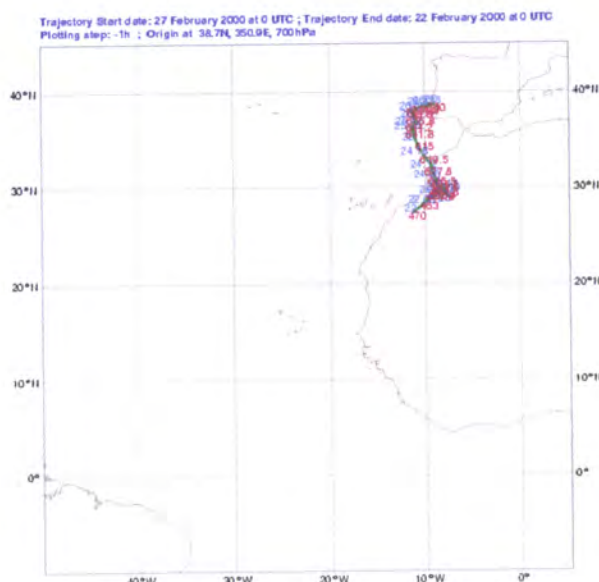


Figura 59 – Retro-trajectória que chega no dia 27 (0 UTC) ao nível 700 hPa aos Olivais

A partícula que chega no dia 27, às 0 UTC, tem origem no Atlântico e apresenta um trajecto continental significativo, excepto a que chega aos 700 hPa que tem origem no Norte de África (ver Figura 59).

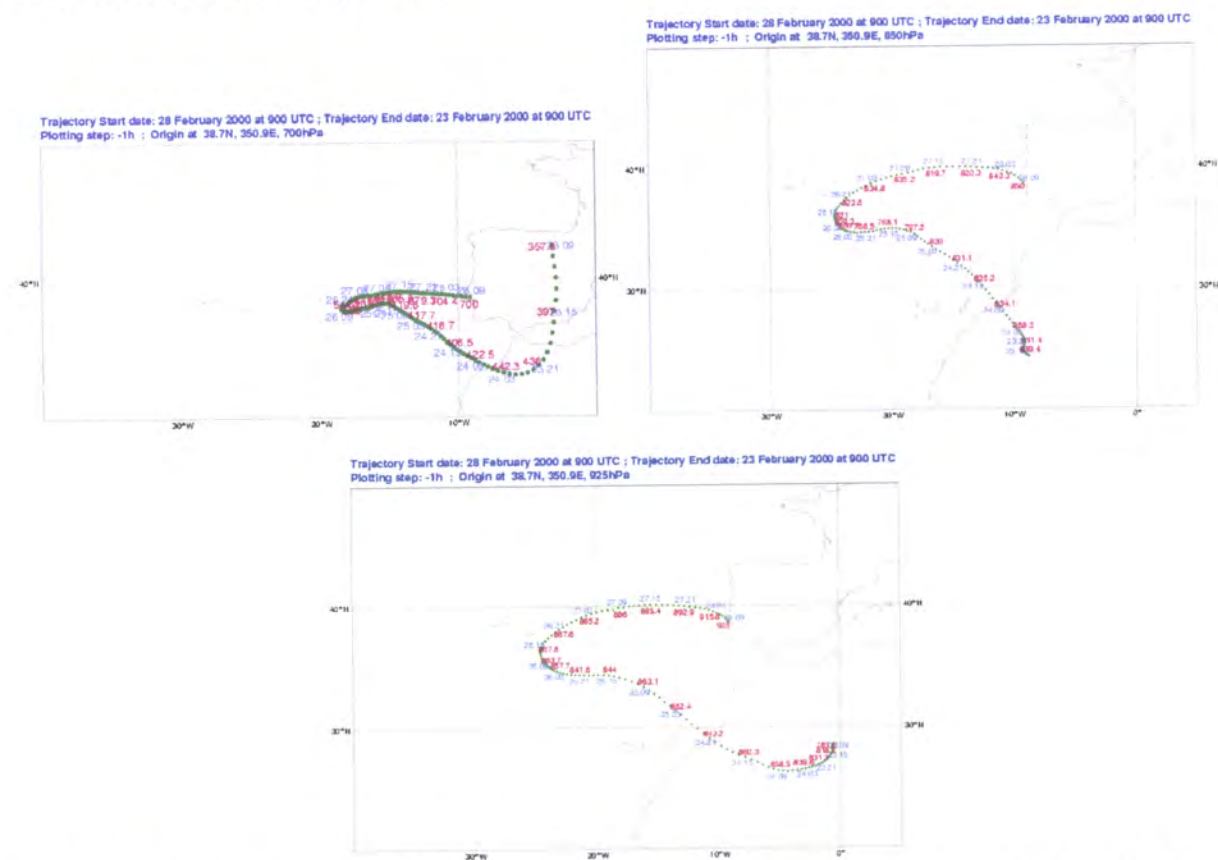


Figura 60 – Retro-trajectórias que chegam no dia 28 (9 UTC) aos níveis 700, 850 e 925 hPa aos Olivais

A partícula que chega no dia 28, às 9 UTC, aos diversos níveis, tem a sua origem no Norte de África ou passa durante o seu trajecto por esse continente (Figura 60). Apesar do trajecto aos diversos níveis se efectuar por África, julga-se que será a camada da atmosfera entre os 925 e os 850 hPa que apresenta a maior contribuição para a concentração elevada de partículas por ser oriunda do deserto.

A partícula que chega no dia 29, às 12 UTC, está associada a uma massa de ar diferente (conforme se pode ver na tabela em anexo).

Apresenta-se uma imagem de satélite *seaWIFS* em que se visualiza bem a poeira oriunda do Norte de África e a frente que originou precipitação apenas nas regiões do Norte.

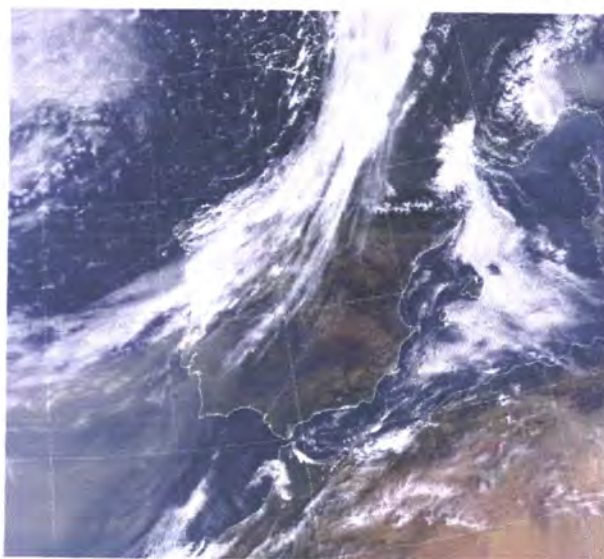


Figura 61 - Imagem de satélite *seaWIFS* do dia 28 de Fevereiro de 2000 (acedida em 19.12.2005)

4.2.1.2.4 *Análise Meteorológica local*

A análise à escala local foi efectuada com base em dados meteorológicos de altitude (sondagem aerológica das 0 e 12 UTC) e de superfície da estação de Lisboa Gago Coutinho e dados de PM_{10} e NO_x das estações da rede de qualidade do ar.

4.2.1.2.4.1 Observações meteorológicas de altitude (Sondagens aerológicas)

A análise dos tefigramas permitiu inferir que no período em análise a atmosfera estava estável às 0 UTC.

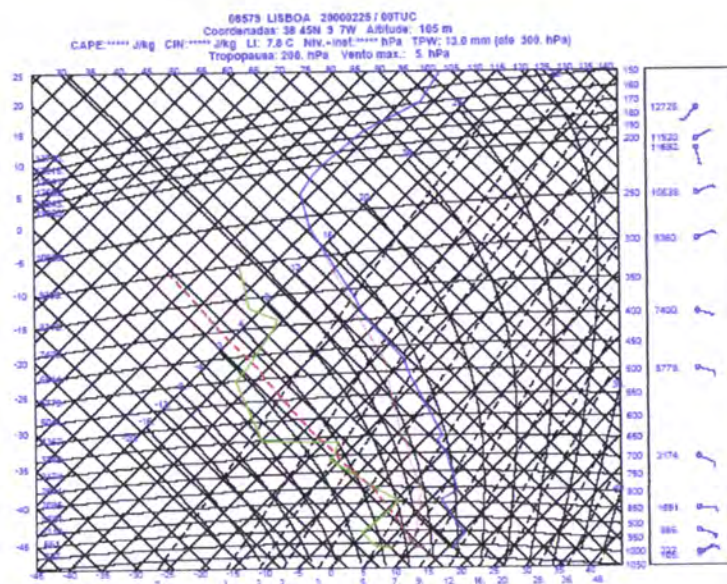


Figura 62 - – Tefigrama referente à sondagem aerológica realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 25 de Fevereiro de 2000, às 0 UTC

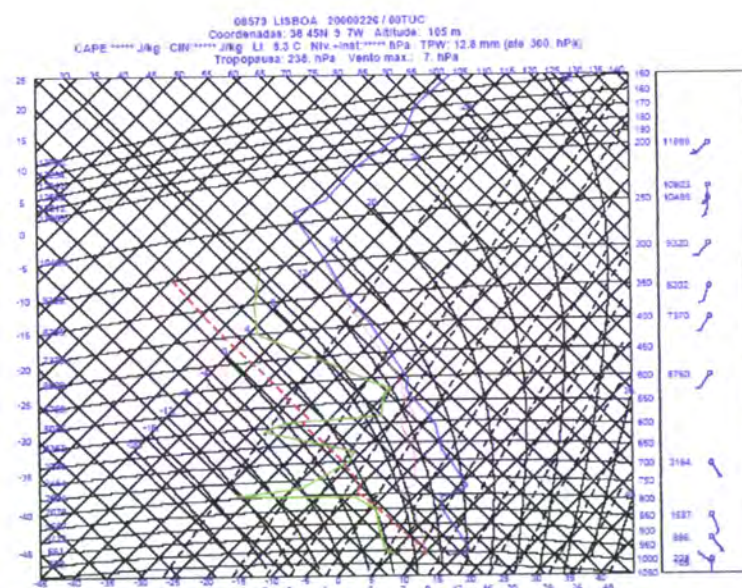


Figura 63 - – Tefigrama referente à sondagem aerológica realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 26 de Fevereiro de 2000, às 0 UTC

Às 12 UTC há sempre uma camada instável à superfície, que atinge neste período o seu valor máximo no dia 29 (cerca de 687 m). No dia 28 é cerca de 543 m.

Nos dias 25 e 26 às 0 UTC observa-se, conforme se pode verificar pela análise dos tefigramas seguintes (Figura 62 e Figura 63), uma camada isentrópica com características de massa de ar do Norte de África. No dia 25 está entre os 6900 e os 7400 m (430 e 390 hPa), tem uma temperatura potencial de 40 graus e uma razão de

mistura entre os 0.2 e 0.9 g/kg. No dia 26 está entre os 4500 e os 5200 m (580 e 540 hPa). A temperatura potencial nessa camada é de 33 graus e a razão de mistura de 2 g/kg.

Nestes mesmos dias, às 12 UTC, e no dia 27 às 0 UTC apenas se observa uma camada mais seca por volta dos 800 hPa.

No dia 27 às 12 UTC e no dia 28 às 0 UTC esta camada está mais baixa (850 hPa). No dia 28 às 12 UTC está novamente mais alta (720 hPa)

4.2.1.2.4.2 Observações Meteorológicas de superfície

Da análise da Figura 64 observa-se um aumento das concentrações no dia 26, com ultrapassagem do valor limite, um decréscimo no dia 27, um aumento significativo a 28 e uma descida brusca a 29

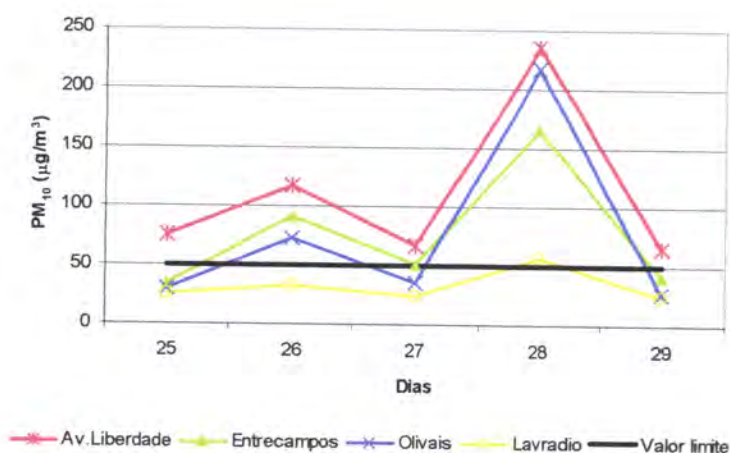


Figura 64 - Concentrações médias diárias de PM₁₀ referentes às estações da Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de 25 a 29 de Fevereiro de 2000

As curvas das 4 estações apresentam o mesmo comportamento, embora as variações no Lavradio sejam mais atenuadas. De resto esta estação só no dia 28 ultrapassa o valor limite.

Na Figura 65 apresenta-se as concentrações horárias de PM₁₀ ao longo do período.

Observa-se um aumento das concentrações a partir das 15 UTC do dia 25 (nas 3 estações da cidade) até às 22 UTC do dia 26 (0 UTC em Entrecampos). No Lavradio, apenas depois das 17 UTC de dia 26 se nota uma subida. No dia 27 as concentrações são relativamente mais baixas, aumentando novamente a partir das

3/5 UTC do dia 28 e atingindo o pico no início da tarde nos Olivais e na Av. da Liberdade e no fim do dia em Entrecampos e Lavradio.

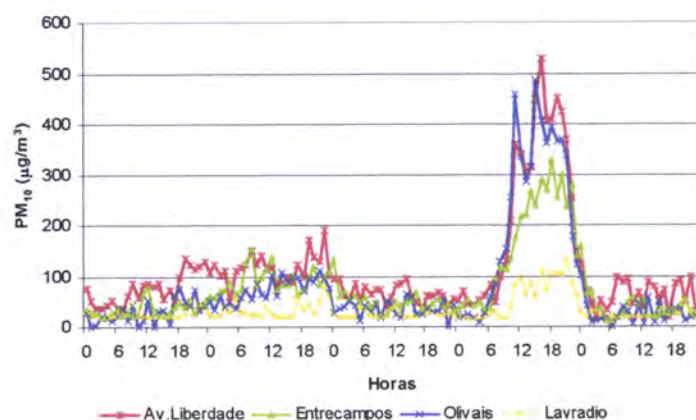


Figura 65 - Concentrações médias horárias de PM₁₀ registadas nas estações da Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de 25 a 29 de Fevereiro de 2000

Na Figura 66 está representada a variação horária das concentrações de PM₁₀ e da velocidade e direcção do vento ao longo do episódio.

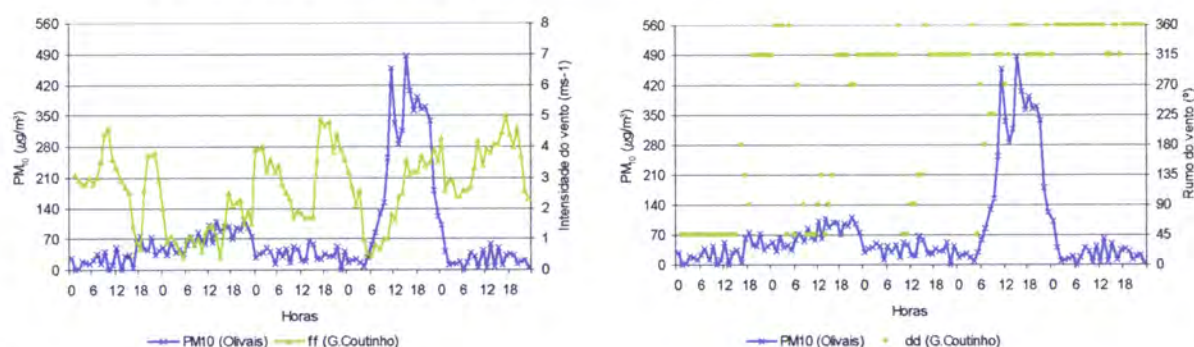


Figura 66 - Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM₁₀ registados na estação dos Olivais, 25 a 29 de Fevereiro de 2000

Evidencia-se apenas o facto de nos dias 27 e 29 as concentrações serem baixas e a velocidade do vento mais intensa. No dia 28, tanto a velocidade do vento como as concentrações aumentam. No início do dia 25 o vento é de leste e torna-se variável para o fim do dia, situação que se mantém a 26. No início e no fim do dia 27 e nos dias 28 e 29 o vento é do quadrante norte, excepto na madrugada de dia 28, quando as concentrações começam a aumentar, e, em que o vento variou.

Como o NO_x também aumentou de dia 25 para 26 nos Olivais, considerou-se importante analisar o comportamento do NO_x nas outras duas estações da cidade (Figura 67).

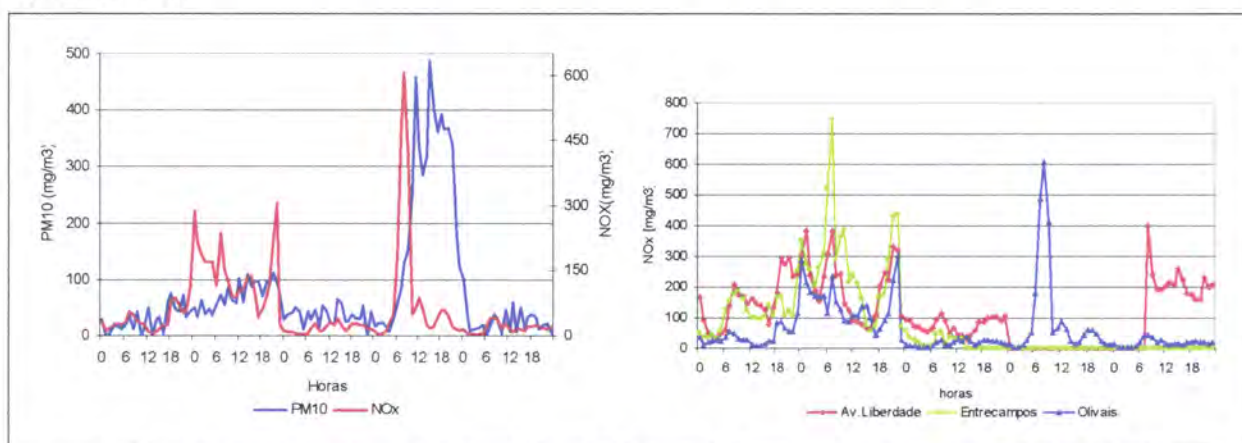


Figura 67 – Concentrações horárias de a) NO_x e PM_{10} na estação dos Olivais, b) NO_x nas estações Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, 25 a 29 de Fevereiro de 2000

Verifica-se o comportamento semelhante nas outras estações. O facto de ambos os poluentes se manterem altos durante esse período, em vez de se observar apenas picos associados a determinadas horas, permite concluir que se trata de um caso de poluição urbana, sem condições para dispersar.

4.2.1.2.5 *Resumo*

Da análise do modelo ECMWF destaca-se a influência de 25 a 27 de uma massa de ar transportada na circulação conjunta de um anticiclone localizado à superfície, aos 925 e aos 850 hPa, entre a Europa Central e o Mediterrâneo, e de uma depressão na região das Canárias. No dia 28, esta situação é alterada pela aproximação de uma superfície frontal às regiões do Norte.

Nos dias 25 e 26, às 0 UTC, é detectado pela análise dos tefigramas, entre os 6900 e os 7400 m e os 4500 e os 5200 m respectivamente, a influência da massa de ar do Norte de África.

O aumento das concentrações de NO_x no período de 25/26 nas três estações da cidade induz que o aumento das partículas teve origem local, mas também que as condições meteorológicas não foram favoráveis à dispersão deste fenómeno de poluição urbana, nomeadamente o vento, que no dia 25, às 12 UTC, aos 850 hPa, diminuiu de intensidade.

No dia 27 as trajectórias aos 700 hPa são oriundas do Norte de África, mas as concentrações são baixas. O facto do vento à superfície ser mais intenso e predominar de norte e aos 850 hPa, às 12 UTC, rodar para sudoeste devido à aproximação da frente corroboraram naturalmente para as concentrações baixas registadas nesse dia à superfície.

No dia 28 as trajectórias dos 700 aos 925 hPa são oriundas ou passam no Norte de África, embora apenas as do 850 e 925 partam do Saara, ou seja há uma camada da atmosfera pelo menos entre os 922 e os 1595 m com partículas vindas do deserto. A passagem da frente terá trazido para a superfície as partículas provenientes do deserto.

4.2.1.3 *Episódio de 30 de Maio a 1 de Junho de 2002*

Este episódio foi associado à situação sinóptica 2 (anticiclone e vale que se estende do Norte de África).

O episódio dura três dias, com início no dia 30 (quinta-feira), com três estações a ultrapassarem o valor limite. As concentrações vão aumentando até dia 1, com todas as estações (excepto os Olivais) a ultrapassarem o valor limite nos dias 31 e 1, e depois descem no dia 2, excepto nas estações da Av. da Liberdade, Laranjeiro e Lavradio que começam a descer no dia 1 (Figura 77).

4.2.1.3.1 *Análise meteorológica sinóptica*

Com base no modelo ECMWF, verifica-se que de 29 a 31, a situação sinóptica à superfície foi caracterizada por um anticiclone localizado no Atlântico que se estendia em crista até aos Alpes e por uma depressão centrada no Norte de África que se prolongava em vale até à Península Ibérica (Figura 68 a)).

No dia 31, às 18 UTC, a situação altera-se, o anticiclone perde o seu domínio e Portugal passa a ficar numa situação de colo, ainda com a depressão centrada no Norte de África (Figura 68 b)).

No dia 2, Portugal passa a ficar sob a influência de um vale, conforme Figura 68 c)).

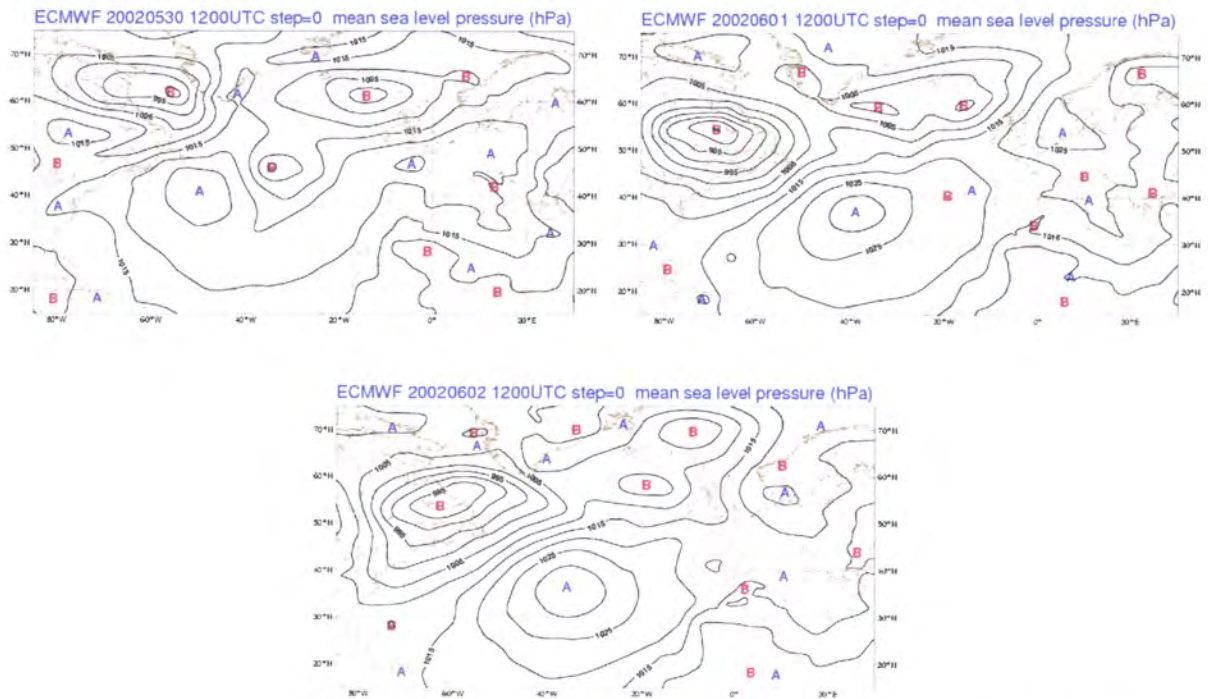


Figura 68 - Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF), a) 30 de Maio, b) 1 e c) 2 de Junho de 2002, 12 UTC

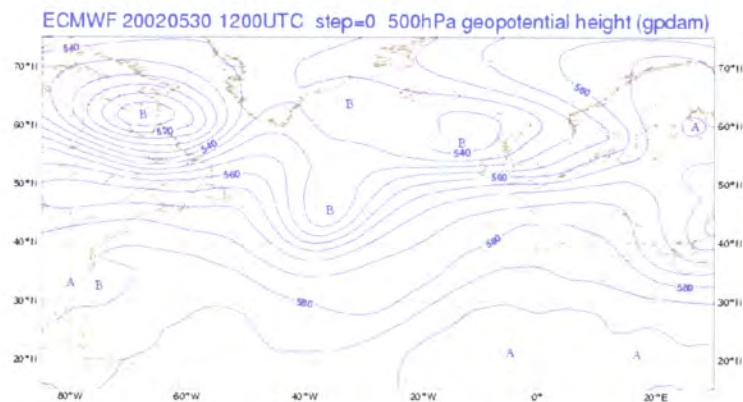


Figura 69 - Análise do campo do geopotencial aos 500 hPa (ECMWF), 30 de Maio de 2002, 12 UTC

Em altitude (500 hPa) a Península Ibérica é influenciada por uma crista que se estende do Norte de África (ver Figura 69) e que antecede um vale que se aproxima no dia 2.

No dia 29 ao princípio do dia ainda existe uma corrente de oeste.

A análise ao geopotencial dos 850 hPa evidencia a Península Ibérica influenciada no dia 29 por uma crista que se estende do Atlântico e a existência de uma depressão no Norte de África (Figura 70 a)).

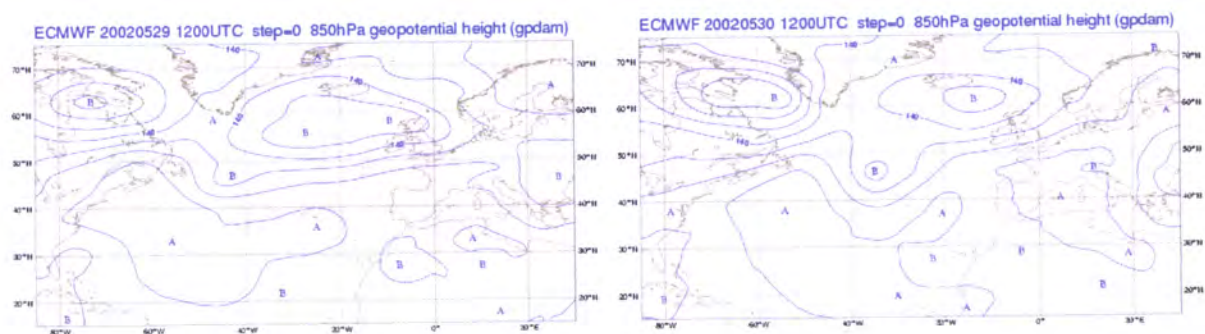


Figura 70 - Análise do campo do geopotencial aos 850 hPa (ECMWF), 29 e 30 de Maio de 2002, 12 UTC

A depressão acima referida enche, mantendo-se no entanto a região como depressionária, e um anticiclone localizado no Mediterrâneo e em deslocamento para nordeste passa a influenciar de 30 a 1 a Península Ibérica (Figura 70 b)).

No dia 2 o anticiclone está localizado na Escandinávia e Portugal é influenciado por um vale.

Aos 700 hPa destaca-se um vale na região das Canárias (Figura 71a). De 30 a 1 passa a predominar a crista do anticiclone localizado no Norte de África (ver Figura 71b).

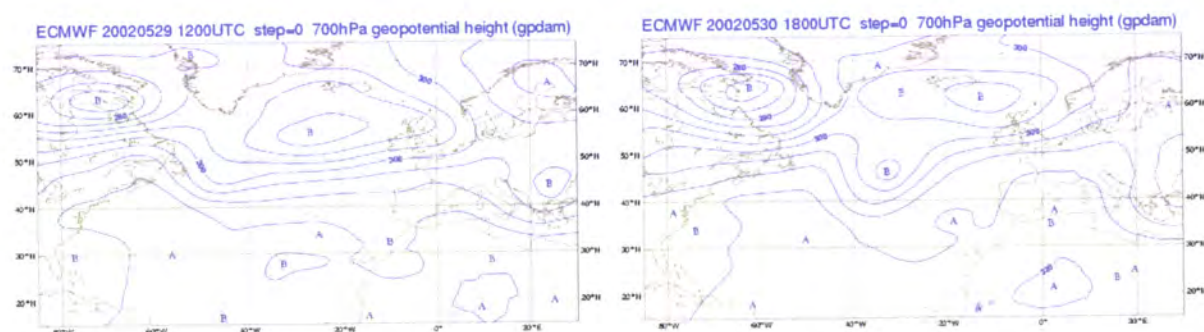


Figura 71 -- Análise do campo do geopotencial aos 700 hPa (ECMWF)a) 29 (12 UTC) e b) 30 (18 UTC) de Maio de 2002

Ao analisar-se o campo da temperatura aos 850 hPa observa-se uma intrusão de 29 a 1 de temperaturas elevadas do Norte de África, com destaque para os dias 30 (Figura 72) e 31.

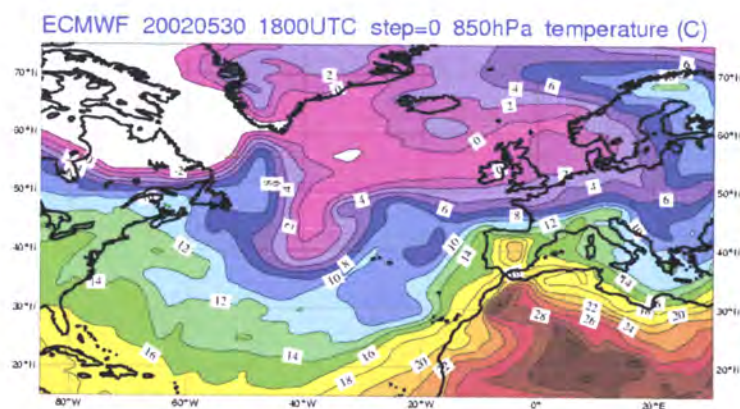


Figura 72 – Análise do campo da temperatura aos 850 hPa (ECMWF), 30 de Maio de 2002, 18 UTC

Aos 1000 hPa destaca-se a advecção negativa de temperatura no litoral, em especial a Sul do Cabo Carvoeiro às 12, 18 e 0 UTC, com valores mais significativos às 18 UTC associados naturalmente às brisas (ver anexo).

Existe advecção positiva de humidade de 29 a 31 que parece vir de sueste (ver anexo).

4.2.1.3.2 Análise meteorológica de mesoscala

A análise do modelo ALADIN permitiu destacar alguns campos.

O vento aos 850 hPa no dia 29 às 0 UTC é de norte, e às 12 UTC observa-se um vale invertido (Figura 73) originando a partir de dia 30 às 0 UTC uma circulação de sueste na região de Lisboa. A partir de dia 1, às 0 UTC, passa a sul na região a Norte de Lisboa enquanto que na região a sul ainda é de sueste.

Aos 1000 hPa é de noroeste durante todo o período numa faixa muito estreita do litoral oeste, nomeadamente em Lisboa.

Segundo este modelo existe advecção de humidade apenas nos dias 30 e 31. Relativamente à temperatura, há advecção positiva aos 850 hPa no dia 30 de sueste e no dia 31 de sul. No dia 1, às 12 UTC, há advecção positiva, que parece de sul, excepto aos 1000 hPa.

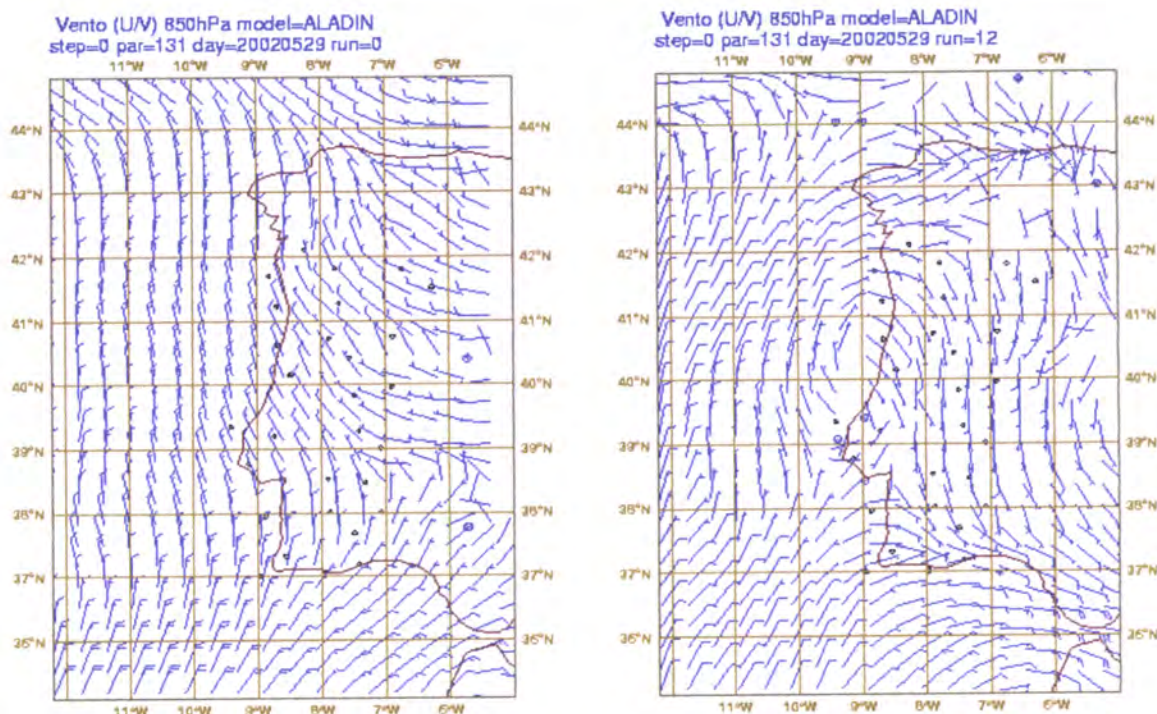


Figura 73 - Análise do campo do vento aos 850 hPa (ALADIN), 29 de Maio de 2002, 0 e 12 UTC

4.2.1.3.3 Análise de trajectórias

Foram efectuadas retro-trajectórias da partícula que chega à zona de Lisboa aos níveis 700,850,925 e 1000 hPa e que são apresentadas em anexo (Tabela A3).

A partícula que chega no dia 29, às 15 UTC, partiu no dia 24 à mesma hora do Atlântico ou do continente americano e efectua aos 925 hPa trajecto na PI, mas junto à costa.

A partícula que chega no dia 30, às 12 UTC, aos 850 hPa, partiu do Sul da Gronelândia, mas tal como se pode observar na Figura 74 a), entra pela segunda vez na Península Ibérica pelo sul, após umas horas no Mediterrâneo.

A que chegou no dia 31, às 12 UTC, ao nível 850 hPa, tem origem no Atlântico, passa pelo Mediterrâneo e entra na PI pela costa sul (Figura 74 c)).

A que chegou no dia 1, aos 850 hPa, teve um percurso significativo na PI, ainda faz um trajecto pelo sul, após umas horas no Mediterrâneo (Figura 74 b)).

A que chegou dia 2, aos 850 hPa, partiu do Norte de África e depois de sair deste continente fez o resto do trajecto no Atlântico (Figura 74 d)).

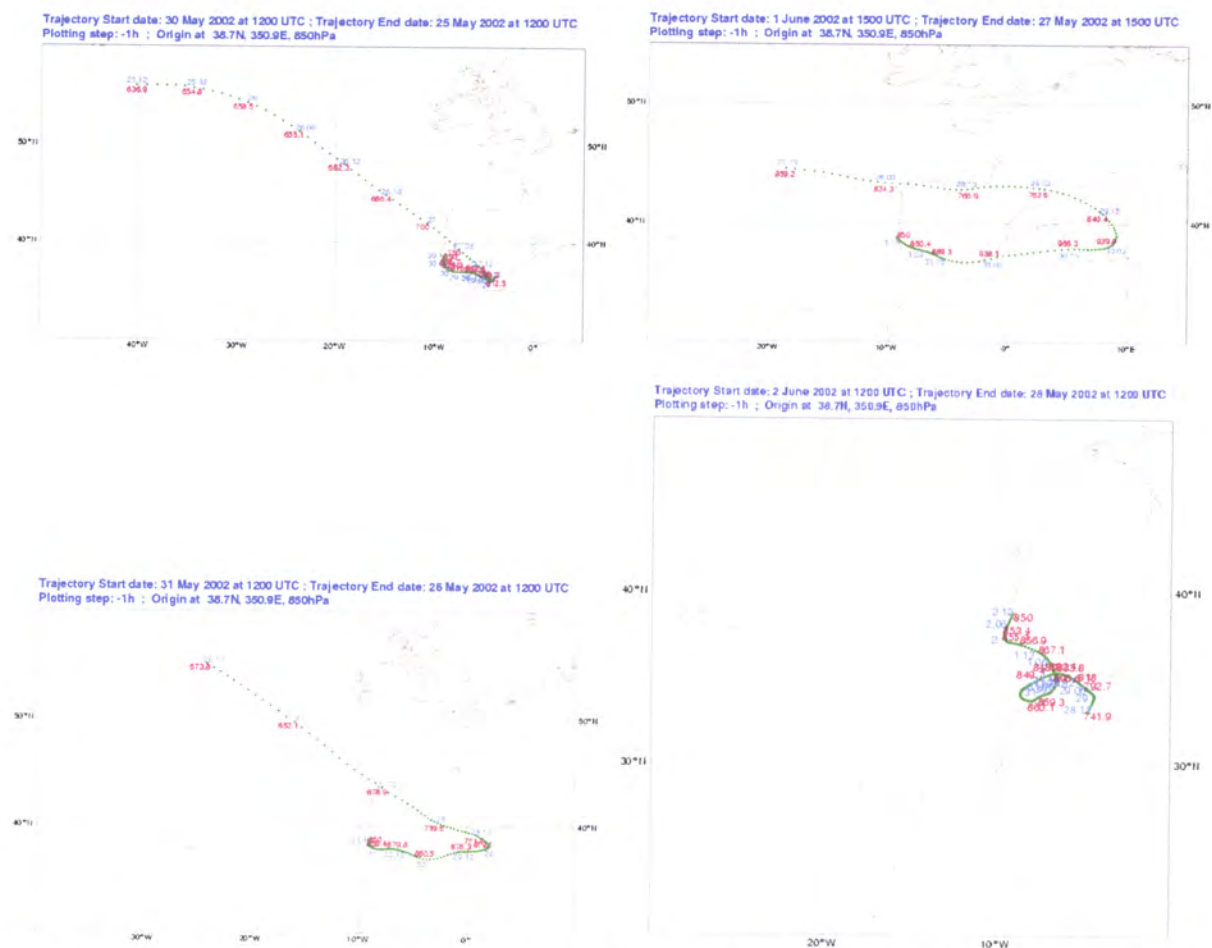


Figura 74 – Retro-trajectórias da partícula que chega no dia a) 30 às 12UTC, b) 31 às 12 UTC, c) 1 às 15 UTC e d) 2 às 12 UTC, ao nível 850 hPa aos Olivais

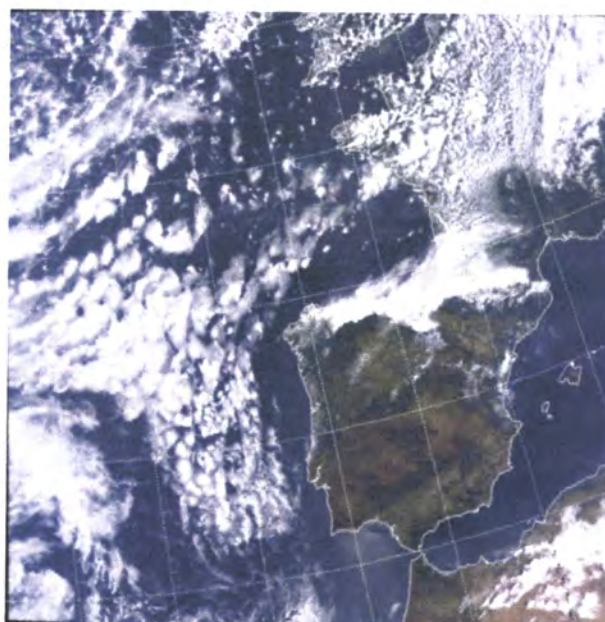


Figura 75- Imagem de satélite MODIS do dia 29 de Maio de 2002, 11h20 UTC (acedida no dia 1.12.05)

Optou-se por apresentar uma imagem de satélite Modis referente ao dia 29 de Maio a qual permite identificar poeira no litoral sul e no Mediterrâneo Ocidental. Nas imagens dos dias 30 e 31, havia nuvens altas que não permitiam visualizar tão bem as poeiras existentes na região do Mediterrâneo. A existência das poeiras do Norte de África no Mediterrâneo nesta época do ano não é rara. Segundo Lunson *in* Dayan, Katsnelson *in* Dayan e Ganor *in* Dayan (1991) as tempestades de areia provenientes do deserto do Saara para o Mediterrâneo ocorrem entre Outubro e Maio.

4.2.1.3.4 *Análise meteorológica local*

A análise à escala local foi efectuada com base em dados meteorológicos de altitude (sondagem aerológica das 0 e 12 UTC) e de superfície da estação de Lisboa Gago Coutinho e dados de PM₁₀, PM_{2.5} e NO_x das estações da rede de qualidade do ar.

4.2.1.3.4.1 Observações meteorológicas de altitude (sondagens aerológicas)

A análise dos tefigramas permite verificar que a atmosfera está sempre estável às 0 UTC e que a altura da camada de mistura é elevada às 12 UTC. A mais baixa observou-se no dia 31 às 12 UTC - 572 m e a mais elevada no dia 29 – 1039 m. Acrescente-se que a altura máxima da camada de mistura estimada do dia 1 é de 1617 m.

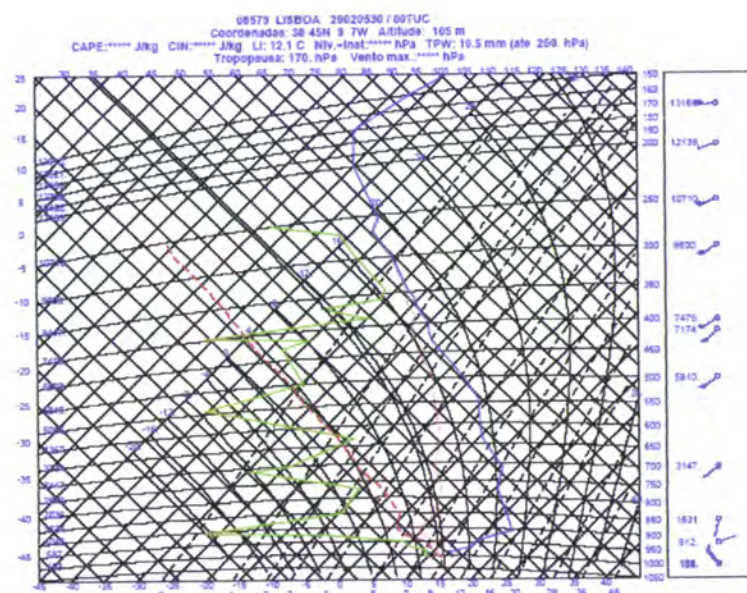


Figura 76 – Tefograma referente à sondagem aerológica realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 30 de Maio de 2002, 0 UTC

A altura estimada, baseada no método de Holzworth (1967), é determinada pela altura em que a adiabática seca referente à temperatura máxima intercepta a curva da temperatura do ar.

Observou-se uma camada isentrópica nos dias 30 e 1, às 0 UTC. No dia 30 há uma camada entre os 5200 e os 5600 m (540 e 520 hPa), com uma temperatura potencial de 45 graus e uma razão de mistura de aproximadamente 0 g/kg (Figura 76). No dia 1 há uma camada entre os 5800 e os 6500 m (500 e 460 mb) com uma inversão no topo, uma temperatura potencial de 44 graus e uma razão de mistura de cerca de 0.9 g/kg.

De 30 a 1, a atmosfera está muito seca logo à superfície (ver Figura 76).

4.2.1.3.4.2 Observações meteorológicas de superfície

Pela leitura da Figura 77 verifica-se que as concentrações vão aumentando até dia 1 e depois descem no dia 2, excepto nas estações da Av. da Liberdade, Laranjeiro e Lavradio que começam a descer no dia 1. Como se constata, a estação dos Olivais, não ultrapassa o valor limite, apresentando, no entanto, um comportamento semelhante às outras estações.

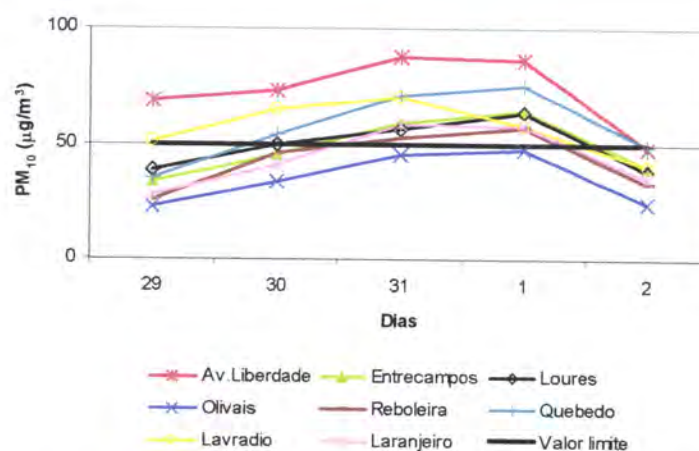


Figura 77 - Concentrações médias diárias de PM_{10} registadas nas oito estações em funcionamento no período em questão

Deste modo, na Figura 78, que permite visualizar o comportamento mais detalhado do episódio, não foi incluída a estação dos Olivais.

Pouco se retira deste gráfico, porque há uma certa dispersão entre as estações e não há picos que se destacam. Destaca-se deste gráfico uma descida generalizada das concentrações a partir das 15 UTC do dia 29 e ao fim do dia no dia 30. Nos dias 31 e 1 as concentrações mantêm-se altas, notando-se uma descida só na madrugada de 2.

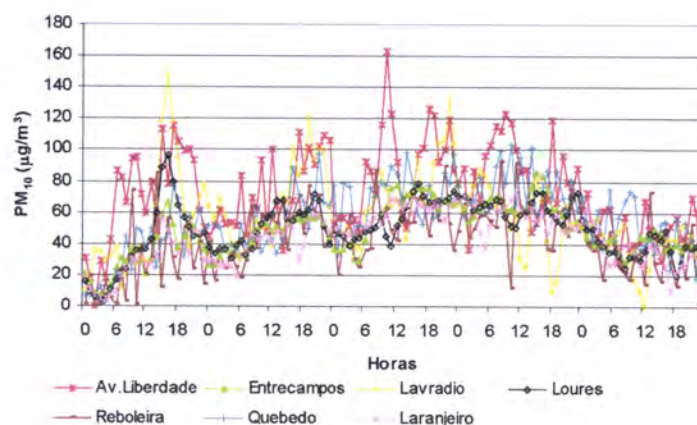


Figura 78 - Concentrações médias horárias de PM_{10} registadas nas sete estações que excederam o valor limite, referentes a 29 de Maio a 2 de Junho de 2002

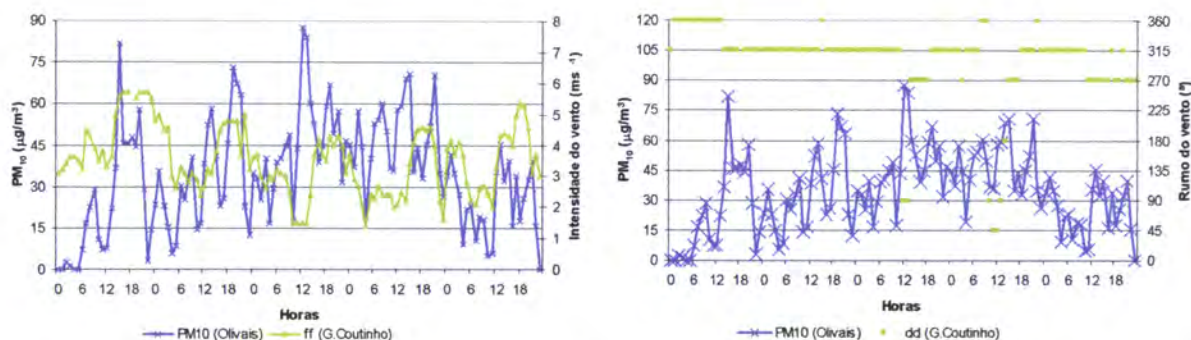


Figura 79 - Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM_{10} registados na estação dos Olivais, 29 de Maio a 2 de Junho de 2002

Pela análise da Figura 79 é mais notório o aumento das concentrações nos Olivais no dia 31 e que se mantém no dia 1. Verifica-se com a leitura deste gráfico que o vento aumenta sempre de intensidade à tarde (a partir das 11/14 UTC) até cerca das 20 UTC. Nos dias 29 e 30 a partir das 11 UTC o vento aumenta de intensidade e as partículas também, coincidindo o pico das partículas (15 e 21 UTC) com o máximo da velocidade do vento (moderado). Logo de seguida há um decréscimo acentuado das

partículas (seguindo o comportamento geral – Figura 78). Surge assim a hipótese do aumento das concentrações ter ocorrido por ressuspensão devido à acção do vento.

No que se refere à direcção do vento verifica-se que este predomina de noroeste. Observa-se que inicialmente no dia 29 o vento é de norte e no 31 as concentrações sobem e descem com vento de oeste.

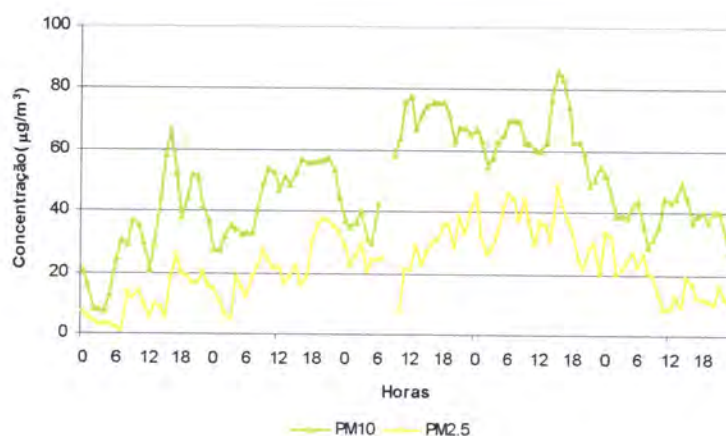


Figura 80 - Concentrações médias horárias de $PM_{2.5}$ e PM_{10} registadas na estação de Entrecampos, 29 de Maio a 2 de Junho de 2002

Dado que se considerou a hipótese de haver uma ressuspensão de partículas pela acção do vento analisou-se o comportamento de $PM_{2.5}$ e PM_{10} (Figura 80) na estação de Entrecampos (a única que media na altura os dois tipos de partículas).

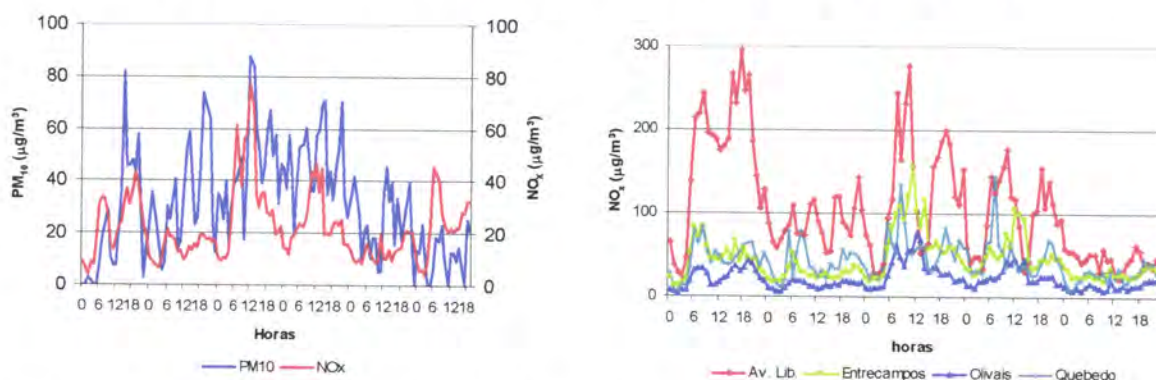


Figura 81 - Concentrações horárias a) NO_x e de PM_{10} registada na estação dos Olivais b) NO_x registada nas estações de Entrecampos, Olivais, Av. de Liberdade e Quebedo, 29 de Maio a 2 de Junho de 2002

Verifica-se uma maior concentração de partículas grosseiras no dia 31, naturalmente associada ao transporte do Norte de África. Nos dias 29 e 30 observa-se um aumento

dos dois tipos de partículas, e não predominantemente grosseiras caso se tratasse de ressuspensão de partículas.

Verifica-se na Figura 81 que no dia 29 as concentrações de NO_x apresentam um comportamento semelhante às PM_{10} na estação dos Olivais o que obrigou a elaboração do gráfico da direita. A Figura 81 b permite observar o comportamento deste poluente nas restantes estações da cidade e em Setúbal ((Quebedo (seleccionada por ser a mais afastada de Lisboa)). Como se verifica o mesmo tipo de comportamento no dia 29 em todas as estações e em Setúbal (exacerbado na Av. da Liberdade), poder-se-á dizer que se trata de um fenómeno de poluição regional.

4.2.1.3.5 Resumo

Este episódio foi escolhido por se caracterizar do ponto de vista sinóptico à superfície por um vale que se estende do Norte de África. Aos 850 hPa, dominou de 30 a 1 um anticiclone localizado no Mediterrâneo que na sua circulação passa pelo Norte de Africa.

Os tefigramas identificam uma camada isentrópica nos dias 30 e 1, às 0 UTC, com características de uma massa de ar do deserto (dia 30-5200 e 5600 m; dia 1-5800 e os 6500 m).

As trajectórias dos 850 hPa, de 30 a 1, evidenciam que as partículas foram transportadas do Mediterrâneo, mas que devem ter tido origem no Norte de África, confirmado pela imagem de satélite Modis. De facto, a existência de um campo depressionário nos níveis baixos na região desértica do Norte de África terá favorecido a ressuspensão de poeiras, as quais terão sido transportadas, para a região em estudo, pelo anticiclone acima referido.

No dia 29, o aumento das concentrações teve como origem um caso de poluição de escala pelo menos regional, que no entanto não foi detectado pelo modelo de trajectórias.

4.2.1.4 Episódio de 23 a 25 de Julho de 2002

O episódio foi classificado pela situação sinóptica 3 (anticiclone à superfície) nos dias 23 e 24 e pela situação sinóptica 1 (anticiclone e uma depressão de origem térmica) no dia 25.

No dia 23 (terça-feira) seis estações ultrapassaram o valor limite. Nos dias 24 e 25 quatro e seis estações, respectivamente (Figura 95).

4.2.1.4.1 Análise meteorológica sinóptica

A situação sinóptica à superfície, ao nível médio do mar, foi caracterizada, de 23 a 25, pela localização de um extenso anticiclone a oeste da Península Ibérica que se estendia em crista em forma de cunha pelo Golfo da Biscaia até aos Alpes. Mais a norte (acima dos 50° latitude norte) deslocavam-se centros de baixas pressões. A parte ocidental do Norte de África esteve sob a acção de uma depressão praticamente estacionária (Figura 82 a). No dia 25, começou a formar-se uma depressão de origem térmica no Sul da Península Ibérica que se mantém no dia 26 (Figura 82 b e c).

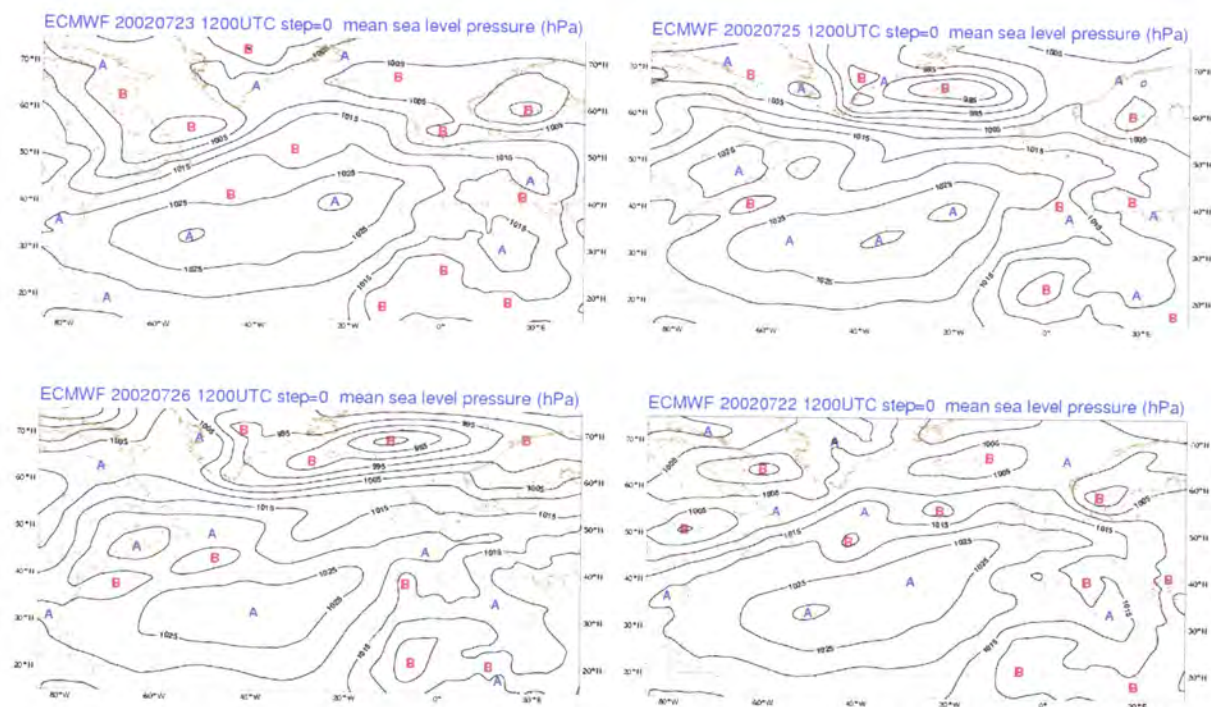


Figura 82 – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF), a) 23, b) 25, c) 26 e d) 22 de Julho de 2002, 12 UTC

No dia 22, dia anterior ao episódio, a Península Ibérica foi influenciada por uma depressão já em fase de enchimento (Figura 82 d).

A sequência de cartas de altitude, aos 500 hPa, permite observar uma depressão centrada no dia 22 na Península Ibérica que se deslocou lentamente para nordeste e que foi substituída por uma crista no dia 23 às 18 UTC que se manteve até ao princípio do dia 26. No Norte de África mantém-se um anticiclone, que se estende em crista até ao Mediterrâneo, que enfraqueceu com a aproximação, no dia 26, de um vale à Península Ibérica ((Figura 83 a e b) e (Figura 84)).

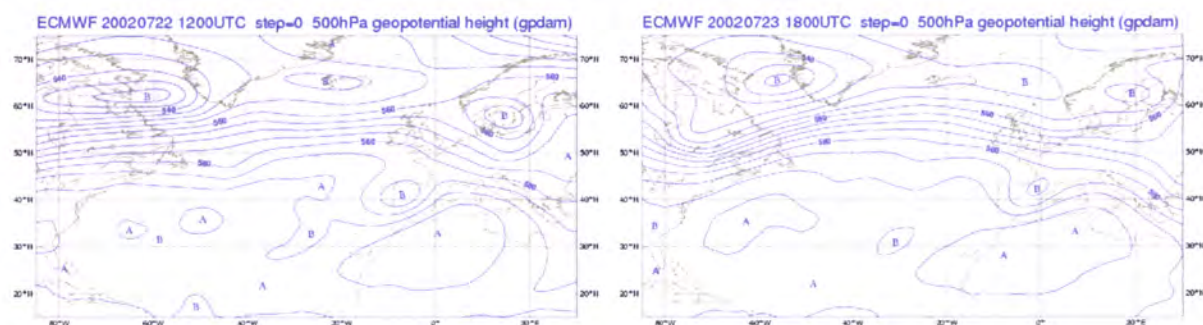


Figura 83 - Análise do campo do geopotencial aos 500hPa (ECMWF), a) 22 (12 UTC), b) 23 (18 UTC)

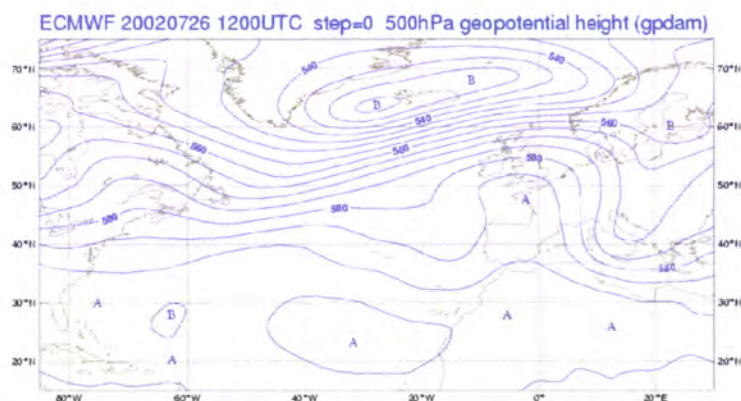


Figura 84 - Análise do campo do geopotencial aos 500hPa (ECMWF), 26 (12 UT Observa-se distribuição semelhante dos centros de acção aos 700 hPa).

Pela análise dos campos do geopotencial aos níveis 850 e 925 hPa constata-se que predomina a crista anticiclónica do dia 23 ao fim do dia 25 (Figura 85 a)). Na parte Ocidental do Norte de África mantém-se a região depressionária.

A análise do campo da temperatura aos 850 hPa evidencia um forte aquecimento da Península nos dias 25 e 26 (Figura 85 b)).

Visualiza-se advecção negativa de temperatura, aos 1000 hPa, no litoral oeste e na costa oeste de África, correspondente ao arrefecimento pelas brisas.

Aos 850 hPa, realce-se uma advecção positiva de temperatura do mediterrâneo durante aproximadamente 24 horas (24 às 12 a 25 12 UTC).

Aos 500 hPa, há advecção positiva de temperatura vinda do sul (África).

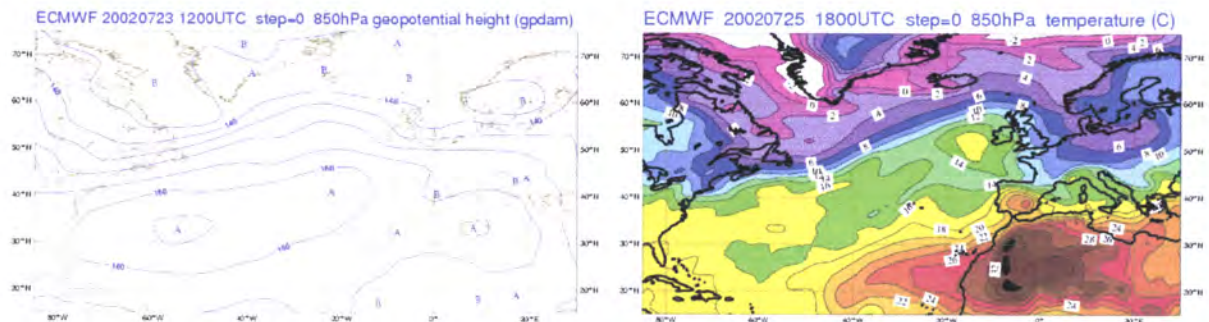


Figura 85 – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF) (23 (12 UTC)) e da temperatura aos 850 hPa (25 (18 UTC))

4.2.1.4.2 Análise meteorológica de mesoscala

A análise do campo da pressão ao nível médio do mar do modelo ALADIN permite detectar a formação da depressão de origem térmica no interior da PI, no dia 24, embora mais bem demarcada no dia 25 (Figura 86).

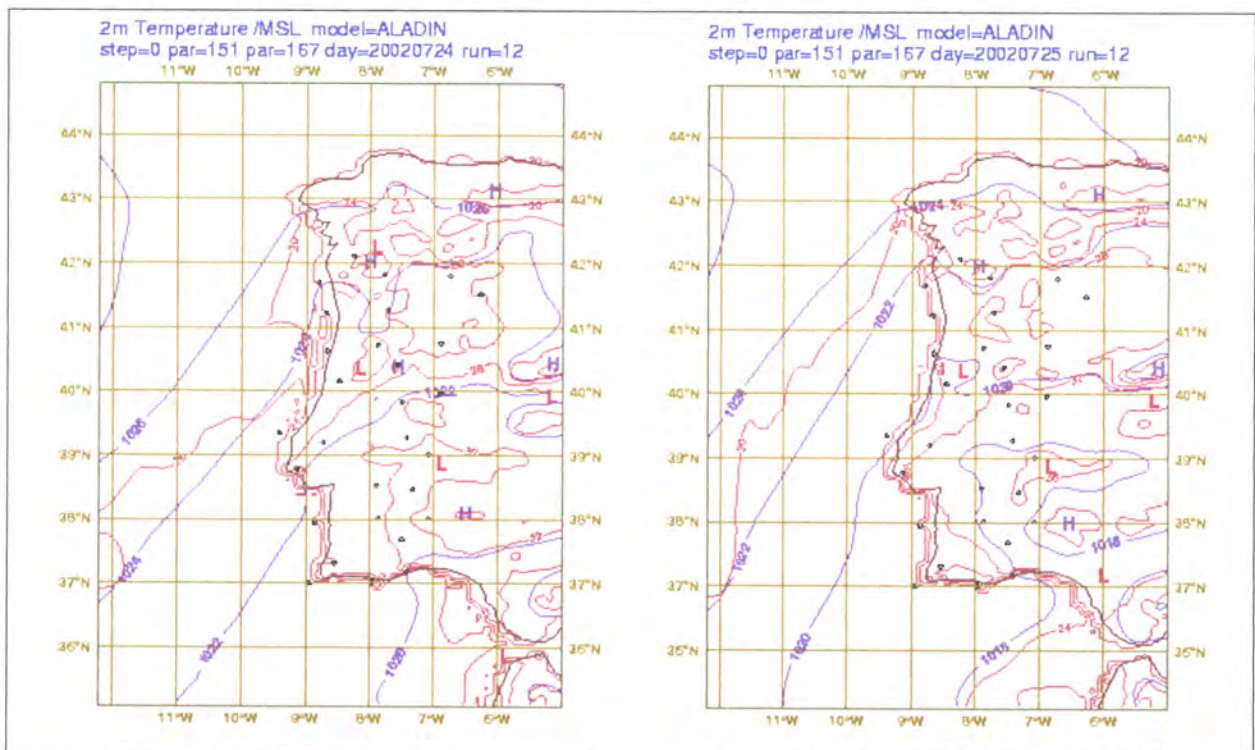


Figura 86 – Análise da pressão ao nível médio do mar (ALADIN), 24 e 25 de Julho (12 UTC)

No dia 22 o vento acompanha, a todos os níveis, a circulação da depressão que condicionou o estado do tempo nesse dia, situação que se mantém às 0 UTC do dia 23. Às 12 UTC, no litoral, já se observa uma circulação de norte.

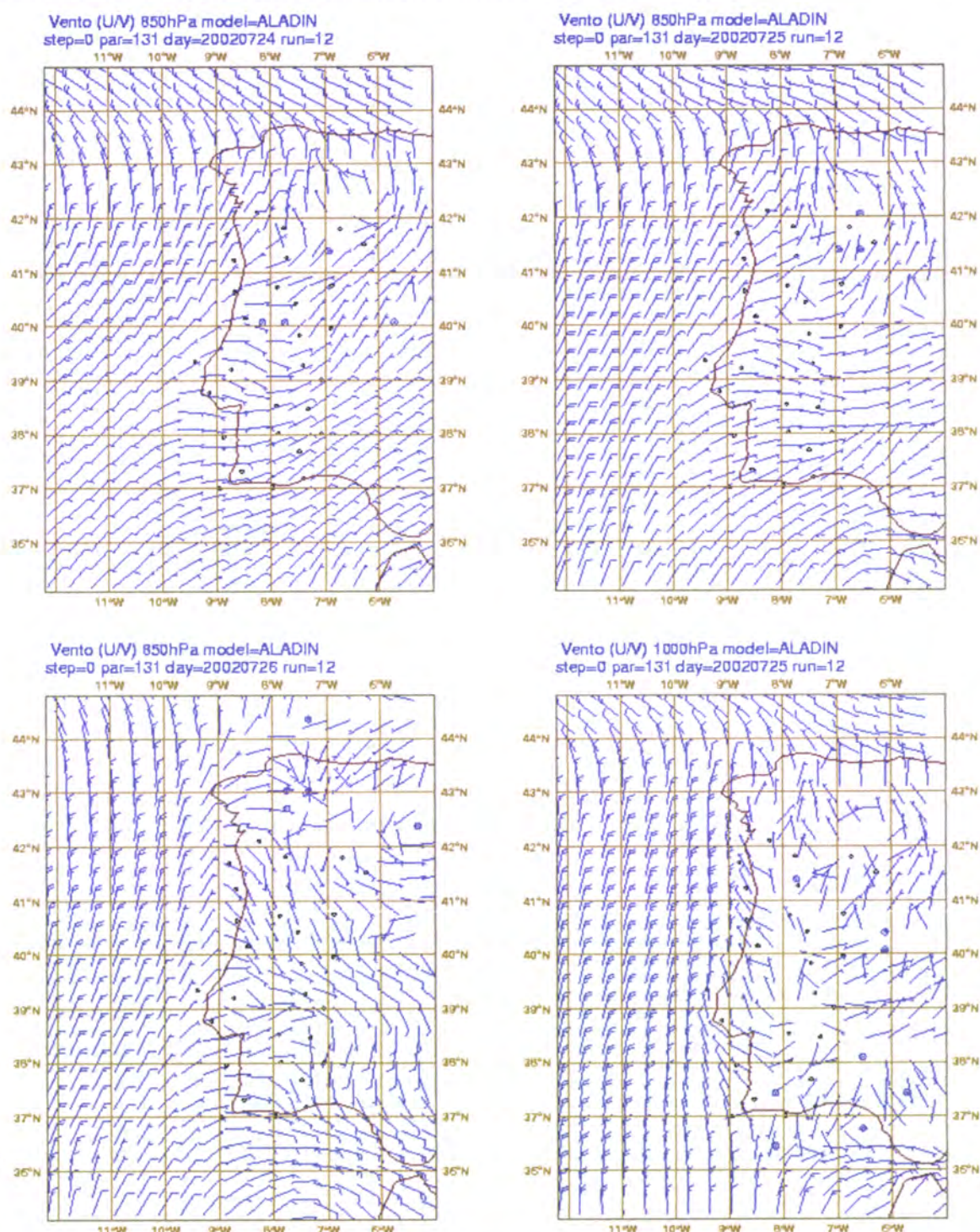


Figura 87 – Análise do campo do vento aos 850 hPa (ALADIN) a) 24, b) 25, c) 26 (12 UTC) e aos 1000 hPa d) 25 (12 UTC)

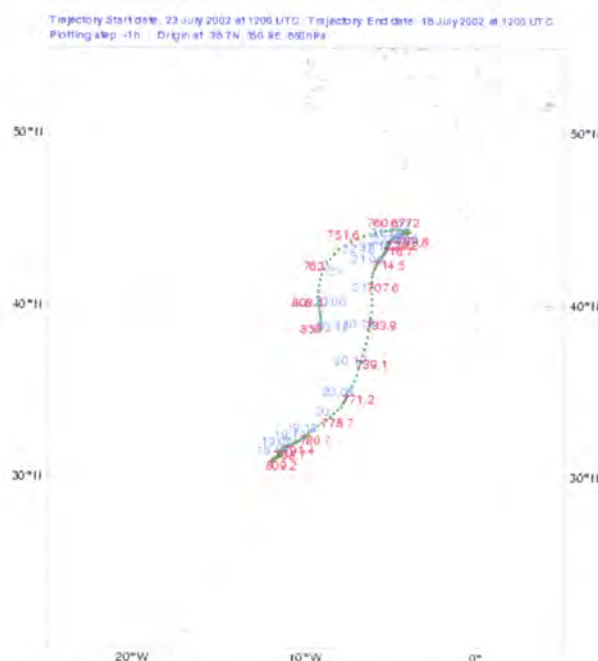
Nos dias 24 e 25 aos 850 e aos 925 hPa (no dia 24 apenas às 12 UTC) o rumo do vento parece acompanhar a circulação anticiclónica, apresentando assim uma componente de leste fraca nas regiões do Sul, incluindo Lisboa (Figura 87 a) e b)).

No dia 26 às 12 UTC o vento aos 850 hPa é do quadrante leste em Lisboa, mas oriundo de uma circulação diferente devido a uma depressão mais a sul (Figura 87 c))

Aos 1000 hPa, a partir de dia 23, o vento está na faixa litoral de noroeste às 12 e de norte às 0 UTC. Refira-se que apenas no dia 25 (Figura 87 d) se visualiza a circulação contornante na PI, com vento de noroeste a Sul do Cabo Carvoeiro e de sudoeste na costa sul do Algarve (Alves, 1992)

4.2.1.4.3 *Análise de trajectórias*

Foram efectuadas retro-trajectórias da partícula que chega aos níveis 850,925 e 1000 hPa que são apresentadas de uma forma resumida na tabela A4 (em anexo).



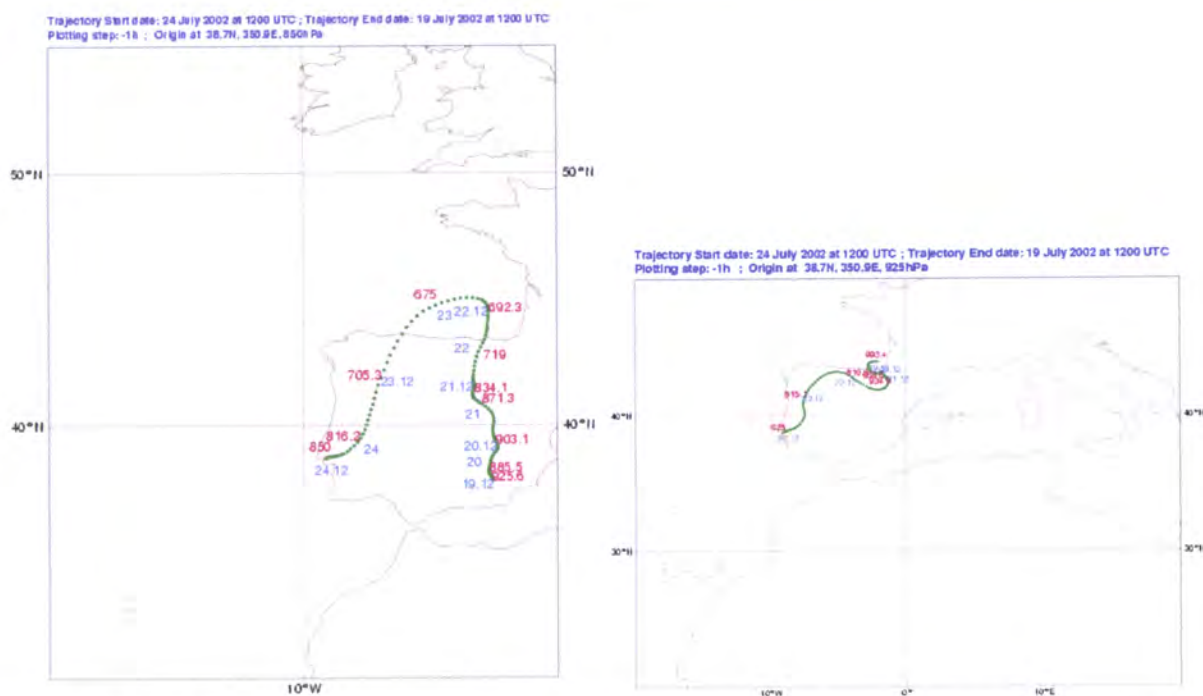


Figura 89 – Retro-trajectórias da partícula que chega no dia 24 (12 UTC) aos a) 850 hPa e b) 925 hPa aos Olivais

De 23 a 26 observa-se um percurso pelo interior da PI significativo, aos níveis 850 e 925 hPa, conforme se pode ver da Figura 88 a Figura 90. A que chega, nestes dias, aos 1000 hPa apresenta um trajecto junto à costa ou apenas no Atlântico.

O facto da massa de ar percorrer um trajecto no interior da Península Ibérica significativo, obriga a tecer a hipótese das partículas registadas nas estações terem sido transportadas dessa zona, originadas por combustão nos incêndios florestais. A última década de Julho foi devastadora em termos de incêndios e por exemplo na Beira Alta houve incêndios de grandes proporções nos dias 21,24 e 26 (SNBPS, 2003).

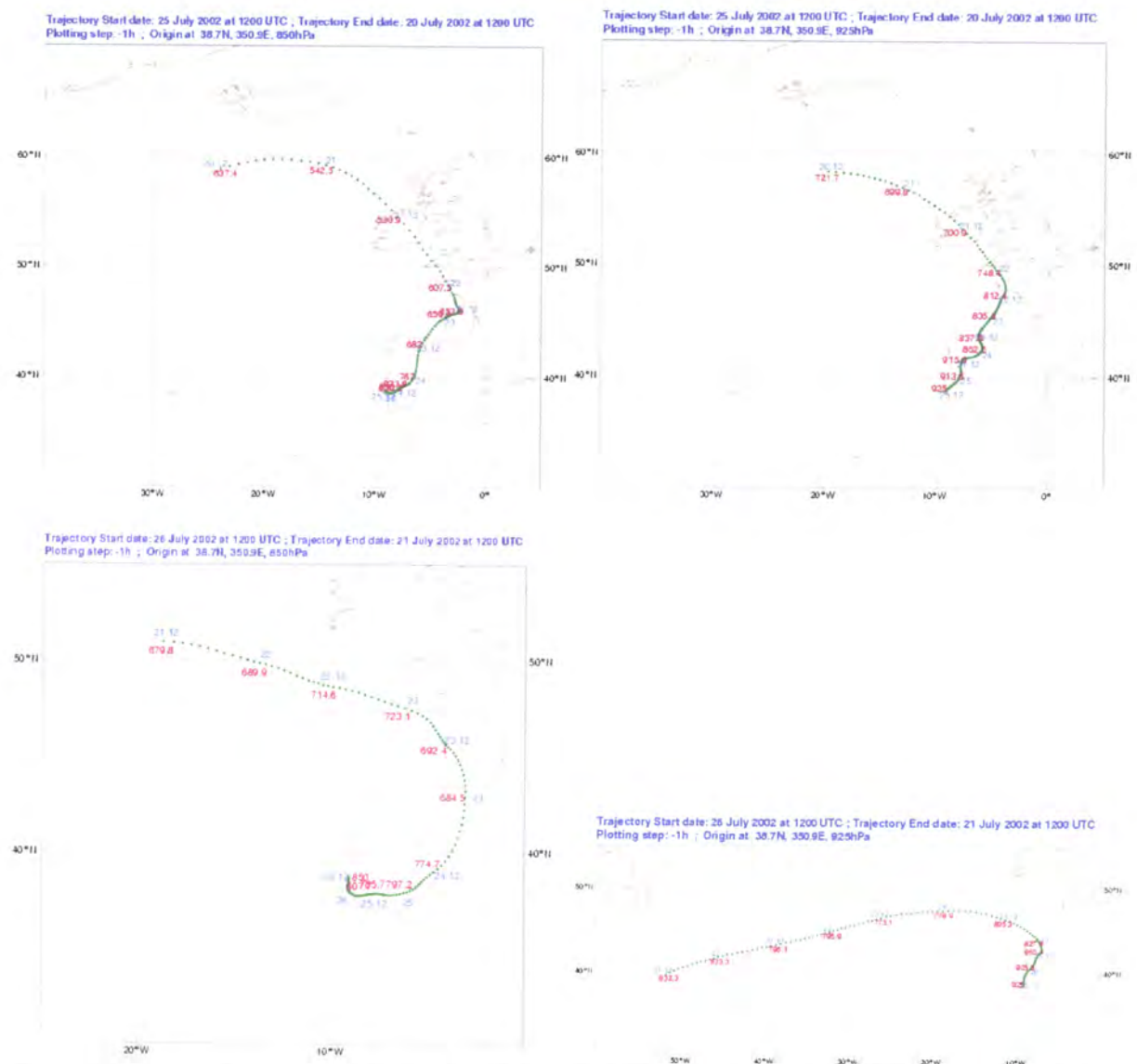


Figura 90 – Retro-trajectórias da partícula que chega aos Olivais: no dia 25, às 12 UTC, a) aos 850 hPa b) aos 925 hPa; no dia 26, às 12 UTC c) aos 850 hPa d) aos 925 hPa

4.2.1.4.4 *Análise meteorológica local*

A análise à escala local foi efectuada com base em dados meteorológicos de altitude (sondagem aerológica das 0 e 12 UTC) e de superfície da estação de Lisboa Gago Coutinho e dados de PM_{10} , $PM_{2.5}$ e NO_x das estações da rede de qualidade do ar.

4.2.1.4.4.1 Observações meteorológicas de altitude (sondagens aerológicas)

A análise do tefograma do dia 22, às 0 UTC, permite confirmar uma camada instável à superfície que às 0 UTC é de 1905 m. No dia 23 ainda se mantêm as condições de instabilidade.

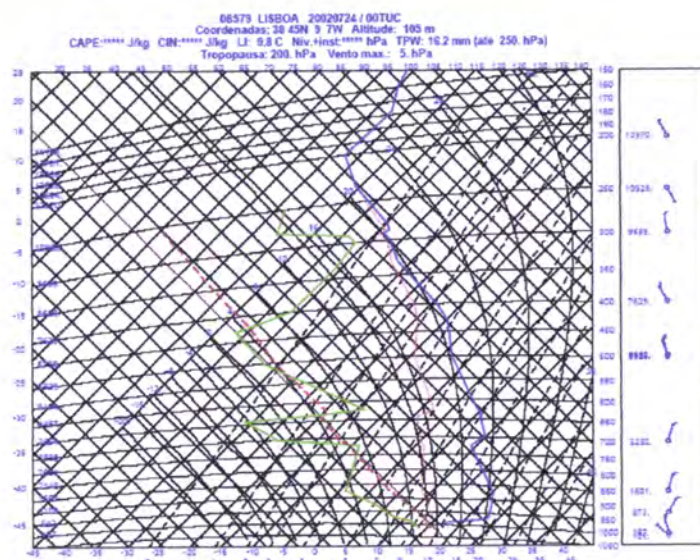


Figura 91 -Tefigrama referente à sondagem aerológica, realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, no dia 24 (0 UTC)

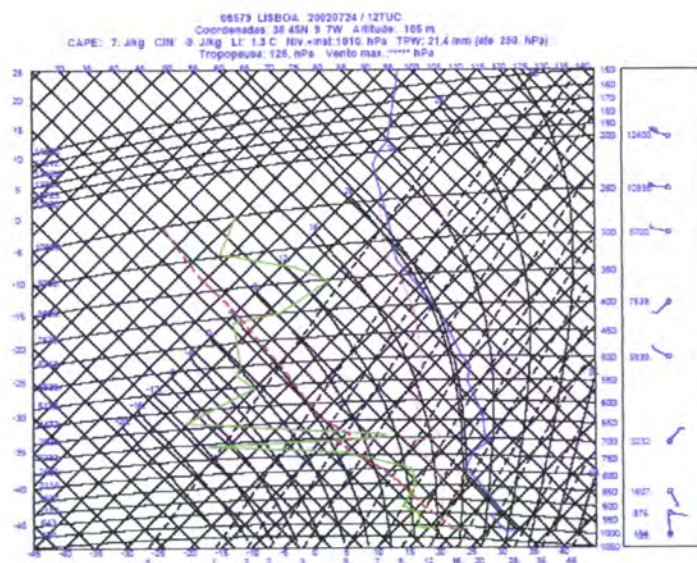


Figura 92 -Tefigrama referente à sondagem aerológica, realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, no dia 24 (12 UTC)

Nos dias 24 e 25, às 0 UTC, há uma inversão de subsidência à superfície de cerca de 500 m (Figura 91 e Figura 93). Às 12 UTC a atmosfera é condicionalmente instável e há uma superadiabática à superfície (Figura 92 e Figura 94). No dia 24 a altura máxima da camada de mistura estimada é de 2306 m e no dia 25 é de 906 m. No dia 26, há uma camada instável junto à superfície de 240 m.

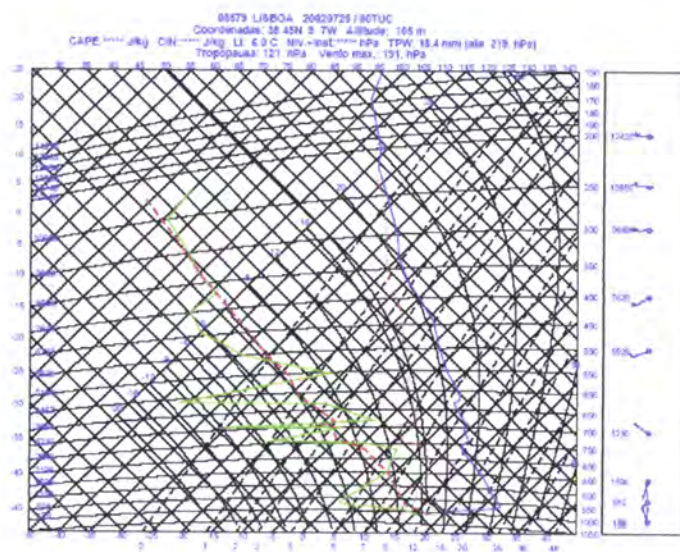


Figura 93 -Tefigrama referente à sondagem aerológica, realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, no dia 25 (0 UTC)

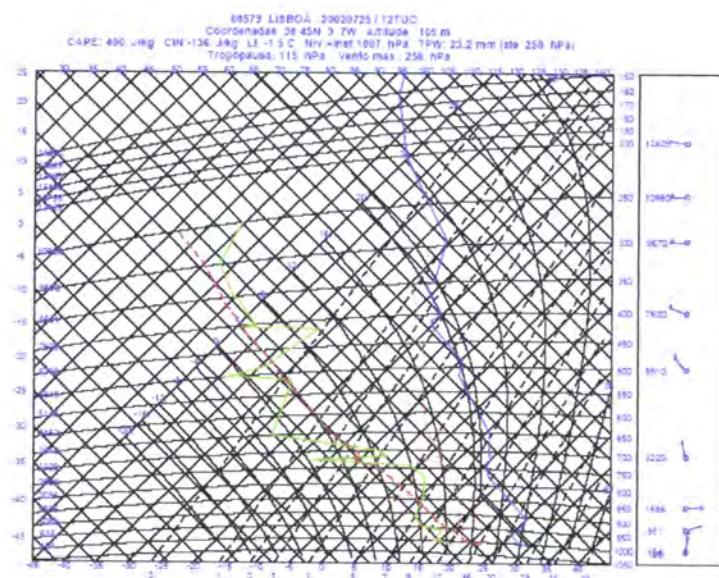


Figura 94 -Tefigrama referente à sondagem aerológica, realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, no dia 25 (12 UTC)

4.2.1.4.2 Observações meteorológicas de superfície

A análise da Figura 95 realça um comportamento geral díspar. No dia 23 todas as estações, excepto os Olivais, registaram concentrações superiores ao valor limite.

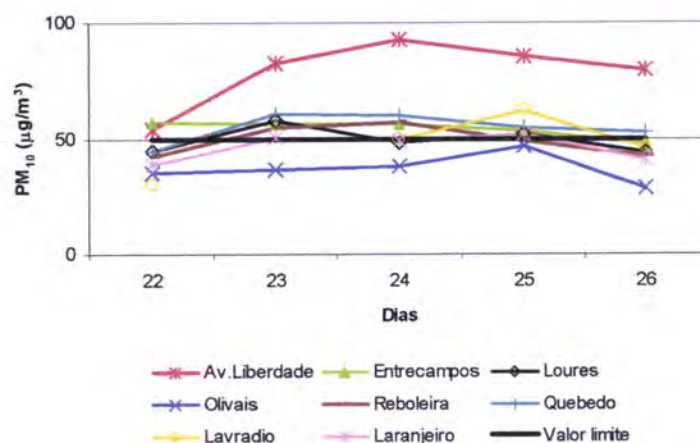


Figura 95 - Concentrações médias diárias de PM_{10} registadas nas oito estações que estavam em funcionamento no período em questão

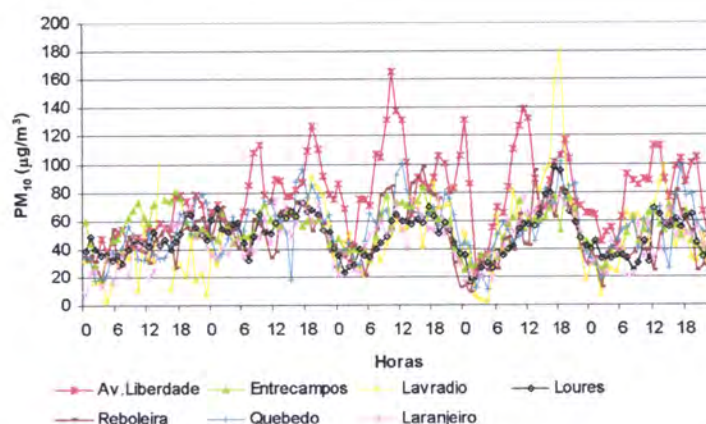


Figura 96 - Concentrações médias horárias registadas nas sete estações que excederam o valor limite, no período de 22 a 26 de Julho de 2002

Quando se analisa a variação horária das concentrações nestas estações (Figura 96), verifica-se que estas vão aumentando ao longo do dia 22. Aumentam ligeiramente ou mantêm até 23 ao fim do dia, altura em que decrescem. De resto, verifica-se em termos gerais, durante o episódio, um aumento das concentrações desde a madrugada até às 17/19 UTC e depois um decréscimo. Este comportamento é mais facilmente observável nos dias 24 e 25 (no dia 25 há mais homogeneidade entre as estações).

A observação da Figura 97 permite inferir que a estação dos Olivais apresenta um comportamento semelhante ao conjunto das outras estações nos dias 24 e sobretudo 25, mas não a 23.

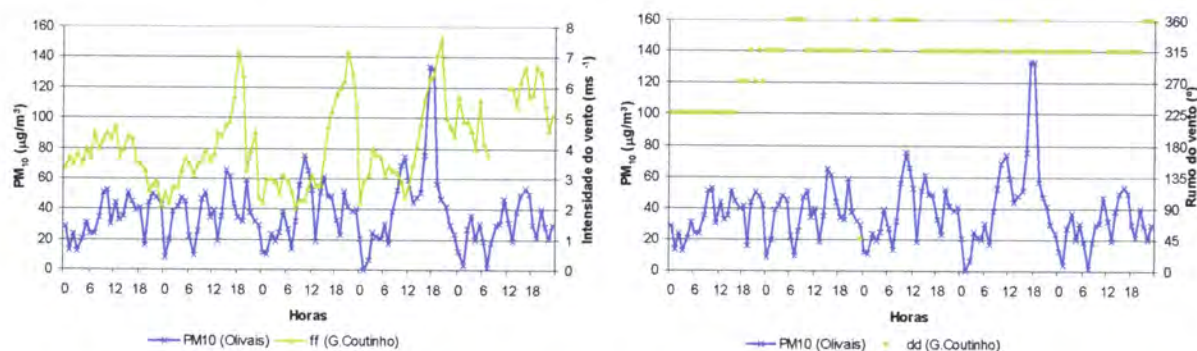


Figura 97 - Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM_{10} registados na estação dos Olivais, 22 a 26 de Julho de 2002

No que se refere ao vento constata-se que este esteve sempre mais intenso durante a tarde.

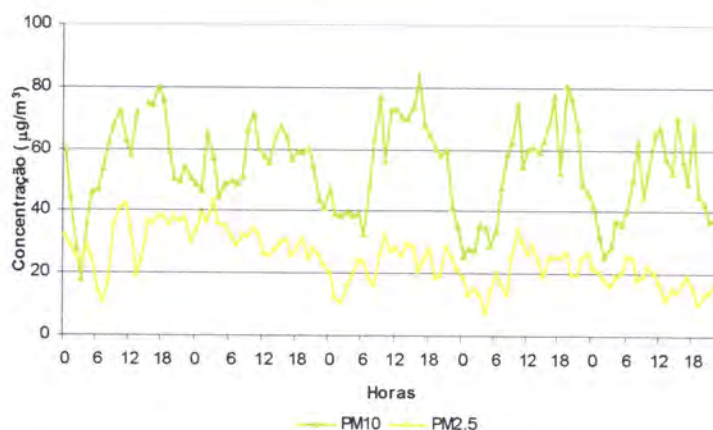


Figura 98 - Concentrações médias horárias de $PM_{2.5}$ e PM_{10} registadas na estação de Entrecampos, 22 a 26 de Julho de 2002

Nos dias 24 e 25 o vento esteve predominantemente de noroeste, mais intenso durante a tarde (nortada). No dia 23, o vento antes das 9 UTC era de norte e passou a noroeste. No dia 22 o vento soprou do quadrante oeste (sudoeste até às 15 UTC).

A análise da Figura 98 sugere que, de 24 a 26, as partículas são predominantemente grosseiras, o que corrobora com o facto de poderem ser transportadas de outro local.

Na Figura 99 visualiza-se o comportamento do NO_x para as quatro estações de Lisboa, mais uma de Setúbal (Quebedo).

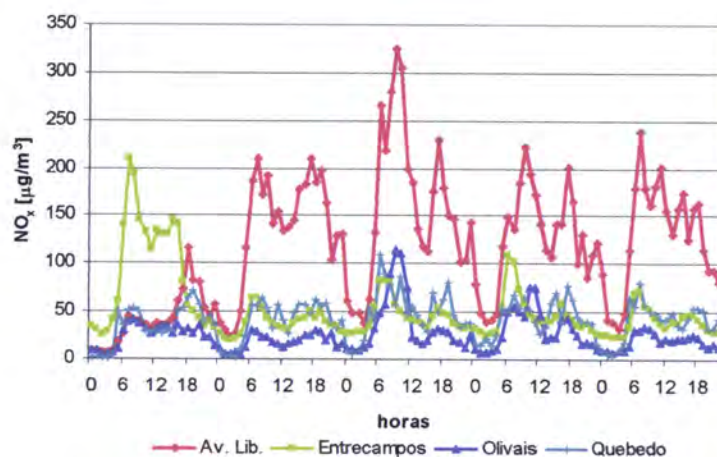


Figura 99 - Concentrações de NO_x registadas nas estações dos Olivais, Entrecampos, Av. Liberdade e Quebedo, 22 a 26 de Julho de 2002

Destaca-se apenas o facto das concentrações de NO_x também apresentarem um decréscimo ao fim do dia e terem dois picos associados às horas de maior tráfego.

4.2.1.4.5 Resumo

Este episódio foi escolhido pelo facto de ter sido influenciado por uma depressão de origem térmica, que é a segunda situação que ocorre com mais frequência no Verão e 20 % das vezes em que ocorre essa situação sinóptica há excedências do valor limite.

De 23 a 25 existe uma crista anticiclónica a todos os níveis analisados. No dia 25 forma-se uma depressão de origem térmica no interior da Península Ibérica. E no dia 26 aproxima-se um vale em altitude. Nos dias 24 e 25, às 0 UTC, havia uma inversão de subsidência à superfície, que às 12 UTC foi quebrada por uma superadiabática, o que revela a existência de turbulência à superfície.

Os ventos aos 850 e aos 925 hPa, corroborados pelas trajetórias, levam a crer que as concentrações elevadas de PM_{10} nos dias 24 e 25 poderão ter vindo do interior da Península Ibérica, por exemplo dos incêndios florestais. Ao fim do dia as condições de mistura na atmosfera e a nortada (reforçada no dia 25 devido à depressão de origem térmica) originaram sempre nestes dias uma diminuição temporária das concentrações.

O dia 22 apresenta condições meteorológicas para uma boa dispersão de poluentes, e portanto não é justificável meteorologicamente o aumento das concentrações ao longo do dia.

No dia 26, a alteração da circulação dos ventos aos 850 hPa e aproximação do vale aos 500 hPa mudaram o cenário meteorológico.

4.2.1.5 *Episódio de 28 a 31 de Dezembro de 2002*

Este episódio foi classificado pela situação sinótica 5 (superfície frontal).

O episódio teve início no dia 28 (sábado), foi interrompido no dia 30, e no dia 31 houve novamente um aumento de concentrações em todas as estações (conforme se pode visualizar na Figura 105).

4.2.1.5.1 *Análise meteorológica sinótica*

No período em análise a posição do anticiclone mais a sul (localizado predominantemente na região das Canárias e estendendo-se em crista pelo Norte de África) permitiu a passagem de depressões por Portugal às quais estiveram associadas superfícies frontais (cuja passagem na região de Lisboa ocorreu no dia 27-0 UTC; 30 depois das 06 UTC e 1 depois das 12 UTC (porque esta última ondulou) (Figura 100).

A passagem das frentes foi alternada por cristas (28 (12 UTC) e 30 (18 UTC) - Figura 101 a e b).

No dia 29 às 0 e no dia 31 às 06 UTC o Continente ainda estava influenciado por uma crista (Figura 101 c e d).

Em altitude, as cristas pós frontais estão como era de se esperar um pouco desfasadas temporalmente da superfície (ver Figura 102).

Relativamente aos ventos verticais, o valor positivo mais elevado é observado aos 850 hPa no dia 27 às 0 UTC associado à passagem da frente e o negativo mais significativo é observado, aos 700 e 500 hPa, no dia 30, às 18 UTC (ver anexo).

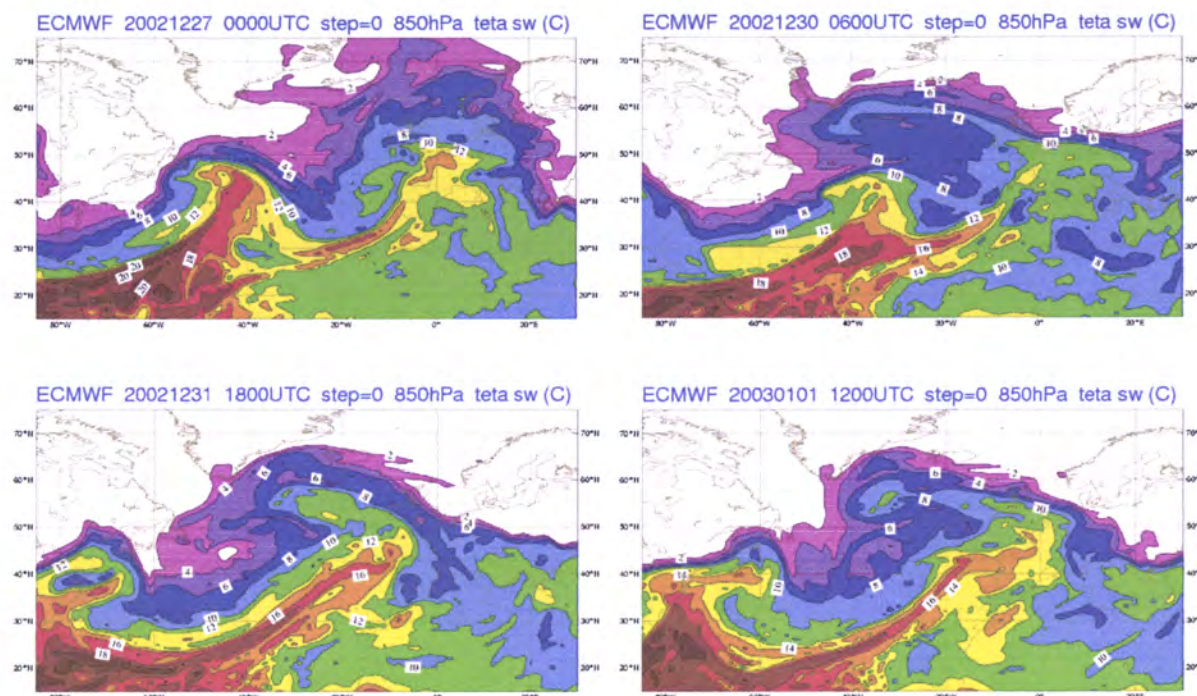


Figura 100 – Análise do campo da pseudo-temperatura potencial do termómetro molhado aos 850 hPa (ECMWF) dos dias 27 (0 UTC); 30 (6 UTC); 31 (18 UTC); 1 (12 UTC)

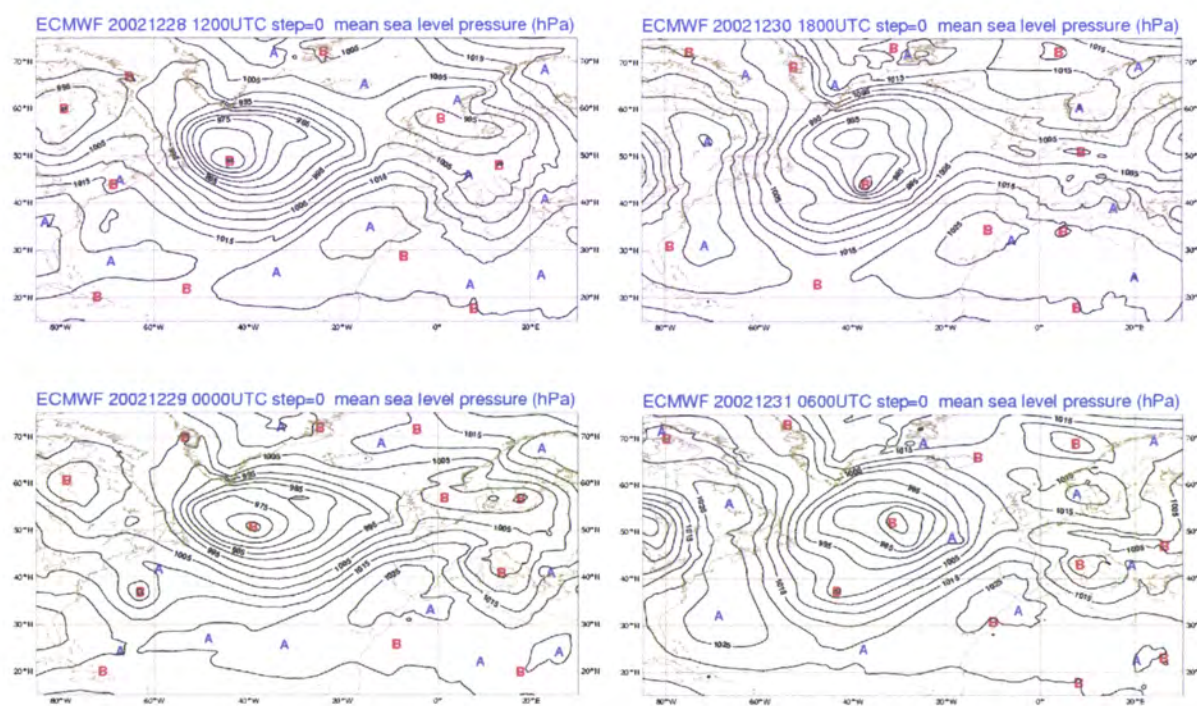


Figura 101 – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF) do dia a) 28 (12 UTC); b) 30 (18 UTC); c) 29 (0 UTC); d) 31 (6 UTC)

A humidade relativa foi sempre superior a 70 % aos 925 hPa. E aos 850 e 700 hPa foi superior a este valor quando da passagem das frentes (aos 850 hPa manteve-se até dia 28 às 6 UTC).

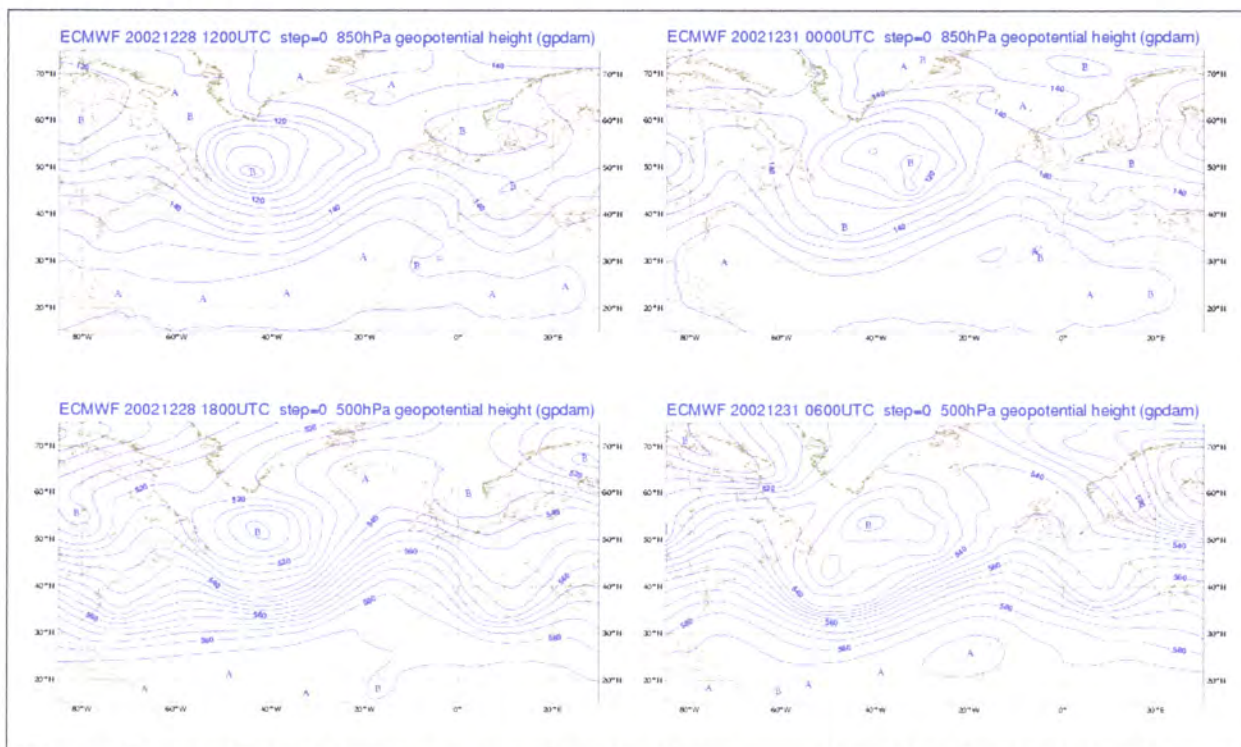


Figura 102 – Análise do campo do geopotencial aos 850 hPa: a) 28 (12 UTC); b) 31 (0 UTC); aos 500 hPa c) 28 (18 UTC); d) 31 (06 UTC)

4.2.1.5.2 Análise meteorológica de mesoscala

Da análise do modelo ALADIN evidenciam-se os campos da pressão ao nível médio do mar e do vento aos 850 hPa.

Confirma-se que o campo da pressão ao nível médio do mar apresenta um forte gradiente no dia 27, mesmo após a passagem da frente (ver anexo).

O vento diminui de intensidade no dia 28 às 12 UTC e no dia 29 às 0 UTC está fraco na região de Lisboa (Figura 103 referente aos 850 hPa), às 12 UTC aumenta de intensidade e roda para sudoeste.

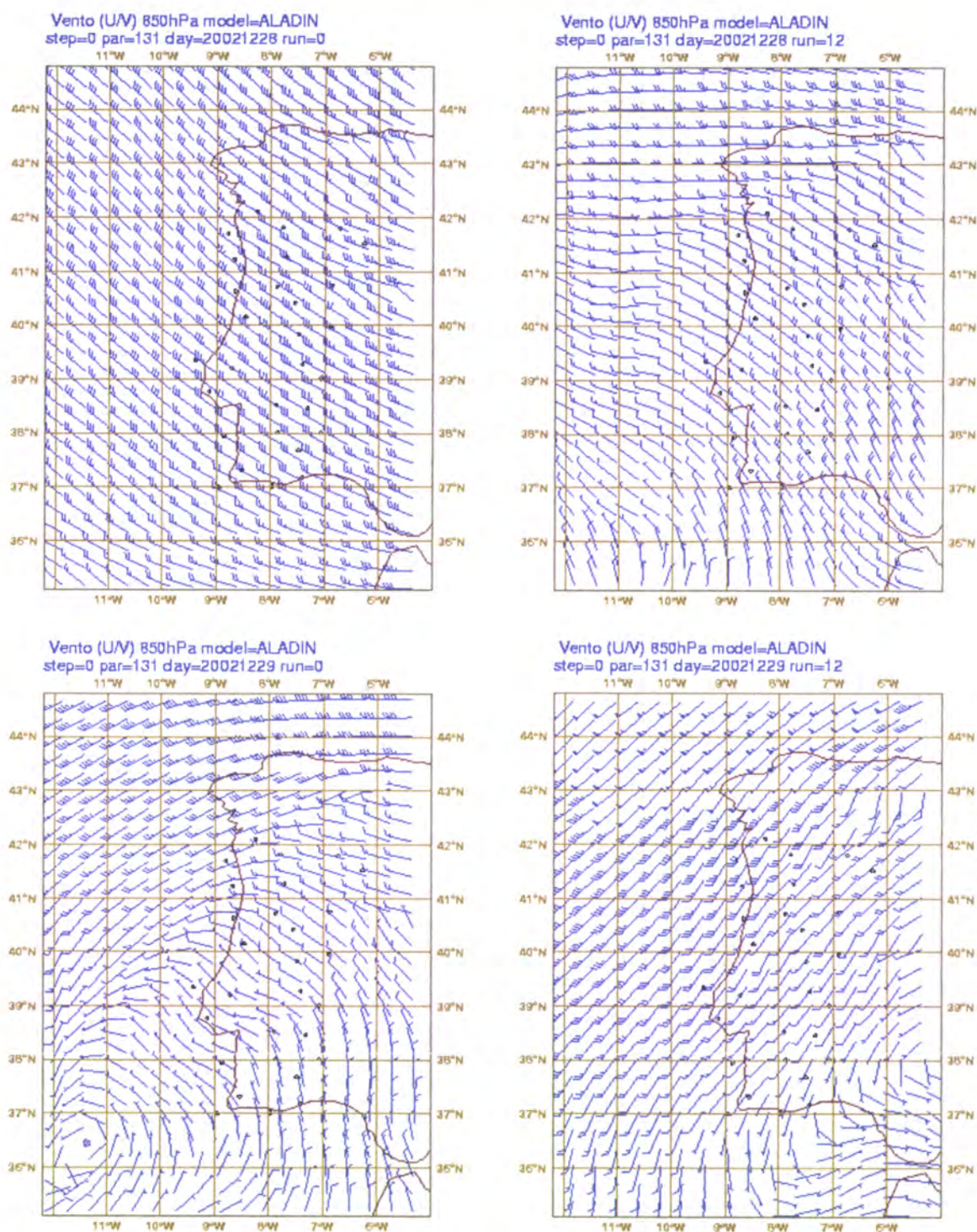


Figura 103 – Análise do campo do vento aos 850 hPa (ALADIN) no dia 28 (0 e 12 UTC) e 29 de Dezembro (0 e 12 UTC)

No dia 30, depois da frente passar o vento sopra de oeste, com uma intensidade significativa (Figura 104).

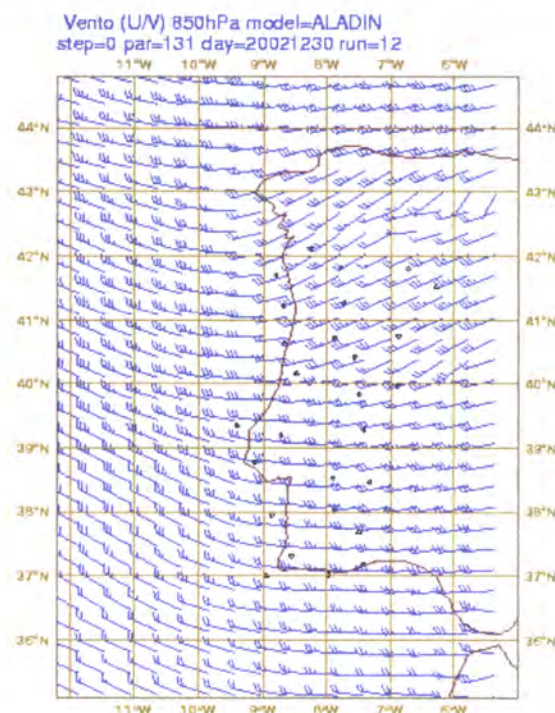


Figura 104 - Análise do campo do vento aos 850 hPa (ALADIN) do dia 30 de Dezembro, às 12 UTC

4.2.1.5.3 Análise de trajectórias

Foram efectuadas retro-trajectórias da partícula que chega aos níveis 850,925 e 1000 hPa às estações dos Olivais e da Chamusca (tabela em anexo).

Constatou-se que a partícula que chega aos Olivais e à Chamusca, aos diversos níveis aos Olivais e a Chamusca, tem trajecto ou origem no Atlântico, chegando directamente à estação respectiva. A massa de ar que chega aos dois locais é semelhante, é “limpa”, e portanto não se considerou relevante evidenciar as trajectórias.

4.2.1.5.4 Análise meteorológica local

A análise à escala local foi efectuada com base em dados meteorológicos de altitude (sondagem aerológica das 0 e 12 UTC) e de superfície da estação de Lisboa Gago Coutinho e dados de PM_{10} e NO_x das estações da rede de qualidade do ar.

4.2.1.5.4.1 Observações meteorológicas de altitude (sondagens aerológicas)

Não foram efectuadas sondagens no dia 30, às 12 UTC, no dia 31 às 0 UTC e no dia 1 às 12 UTC.

No dia 27 a atmosfera é condicionalmente instável às 0 UTC, e apresenta uma camada instável desde a superfície até aos 8900 m, às 12 UTC. Nos restantes dias em que houve sondagem a atmosfera está estável às 0 UTC (excepto no dia 28 em que existe uma camada estável apenas até aos 1494 m). No dia 28, às 12 UTC a camada instável junto à superfície é de 1786 m e no dia 31 às 12 UTC de 1278 m.

4.2.1.5.4.2 Observações meteorológicas de superfície

Destaca-se, pela análise da Figura 105 um pico de concentrações no dia 31 em todas as estações, após um decréscimo acentuado no dia 30 (apenas duas estações continuaram com valores superiores ao limite).

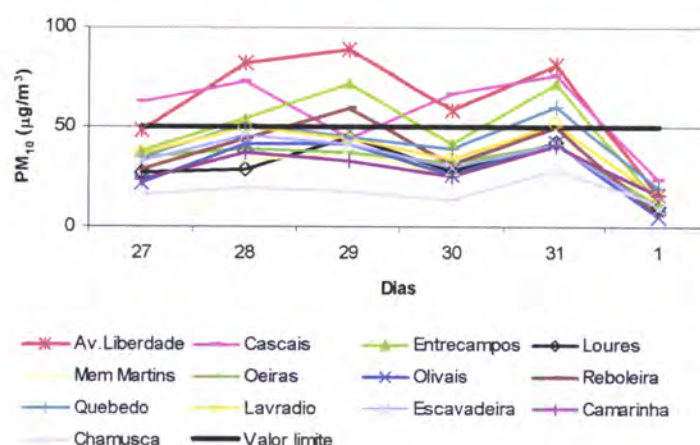


Figura 105 - Concentrações médias diárias de PM₁₀ registadas nas 13 estações que estavam em funcionamento no período de 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003

Verifica-se um aumento das concentrações até dia 29 nas estações da Av. da Liberdade, Entrecampos, Reboleira e Loures. Nas restantes estações as concentrações diminuíram no dia 29.

A análise ao comportamento horário dessas mesmas estações (Figura 106) permite observar uma subida das concentrações no dia 28 em todas as estações, a partir da madrugada (mais acentuada a partir das 15 UTC), com o pico a ser atingido a horas diferentes ao fim do dia (entre as 19 e as 21 UTC nas estações de Cascais, Quebedo

e Lavradio e entre as 0 e as 2 UTC nas estações da Av. da Liberdade, Reboleira e Entrecampos).

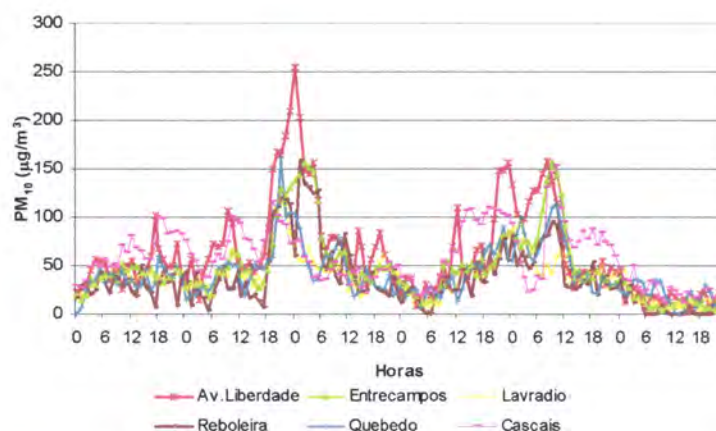


Figura 106 - Concentrações médias horárias de PM_{10} registadas nas estações que excederam o valor limite, no período de 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003

Depois vai descendo gradualmente até à madrugada de 30, (a frente passou depois das 6 UTC) não obstante uns ligeiros picos por volta das 9 e das 21 UTC. As concentrações voltam novamente a subir no dia 30 até às 9/10 UTC de dia 31 (com um decréscimo pequeno no fim da manhã de 30), descendo novamente a partir dessa hora. Destaca-se a Av. da Liberdade e Cascais com os seus valores mais altos (estações de tráfego).

Analizou-se o comportamento horário das estações dos Olivais e Chamusca, dado que estas estações vão ser usadas nas retro-trajectórias (Figura 107).

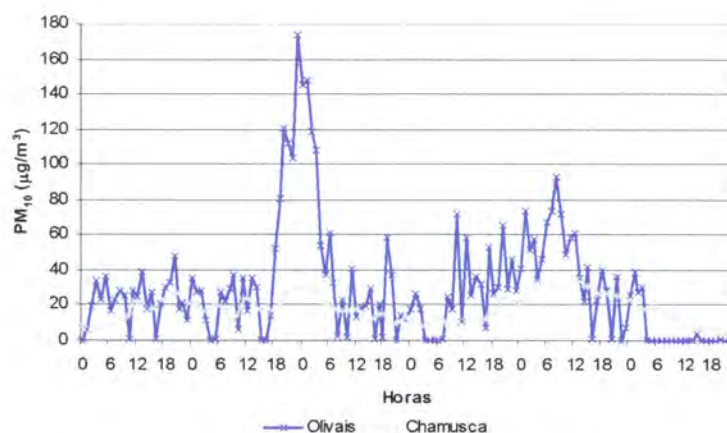


Figura 107 - Concentrações médias horárias registadas nas estações dos Olivais e da Chamusca, no período de 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003

Observa-se nos Olivais o pico de dia 28 e a subida a 30. Mas esta estação apresenta um comportamento mais brusco e não gradual, nomeadamente no dia 29 e na descida do dia 31. Na Chamusca evidencia-se a subida no dia 30 às 16 até às 12 UTC de dia 31 (8 UTC nos Olivais).

Quando se analisa a variação das concentrações de partículas com a variável vento (Figura 108) verifica-se que a velocidade é mais intensa no dia 27. Das 15 às 23 UTC do dia 28 as concentrações aumentam e a velocidade do vento diminui. Houve também um aumento da intensidade do vento desde dia 29 às 2 até 30 às 13 UTC. Depois diminuiu até dia 31 às 8 UTC (quando se atingiu o pico nos Olivais). No entanto as concentrações começam a aumentar desde a madrugada, bem como o vento.

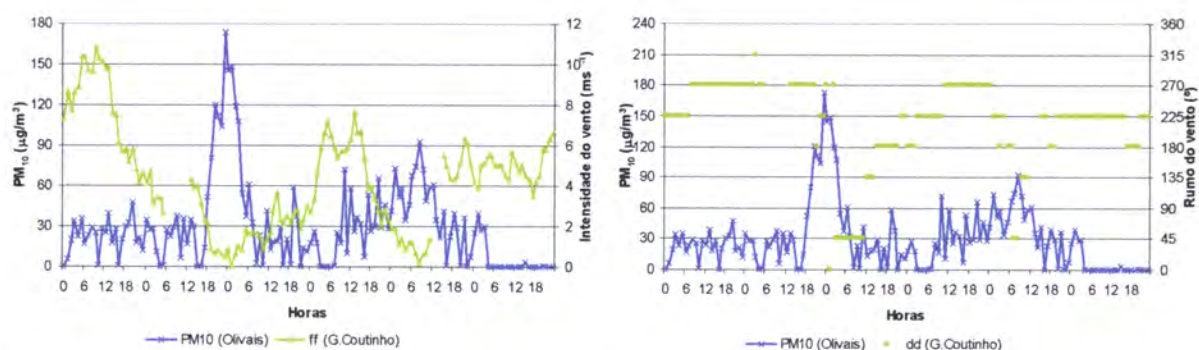


Figura 108 – Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM₁₀ registados na estação dos Olivais, 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003

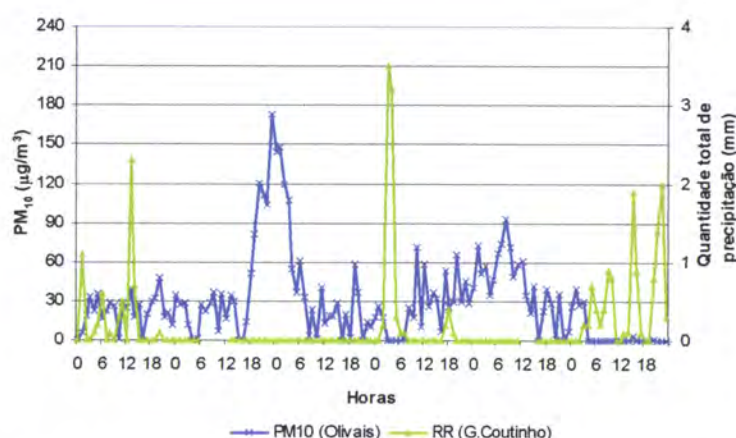


Figura 109 – Valores horários de concentração de PM₁₀, registados na estação dos Olivais, e de quantidade de precipitação registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003

Antes e no principio da subida de dia 28 o vento é de oeste, 3 horas antes de atingir o pico, passa a sul/sudoeste e depois desce com oeste. No dia 29 está variável. No dia 30, o vento é de sudoeste, passa a oeste às 11 UTC e a nordeste quando atinge o pico e depois ainda desce umas horas com vento de sueste.

Para se analisar a variação das concentrações das partículas com a ocorrência de precipitação construiu-se o gráfico seguinte (Figura 109).

Destaca-se o facto de no dia 1 as concentrações se reduzirem a zero quando começou a chover. No entanto, no dia 30 entre as 15 e as 17 UTC, as concentrações aumentaram um pouco apesar de ter chovido.

Apresenta-se na Figura 110 o comportamento do NO_x nas quatro estações da cidade de Lisboa, no Quebedo e na Chamusca.

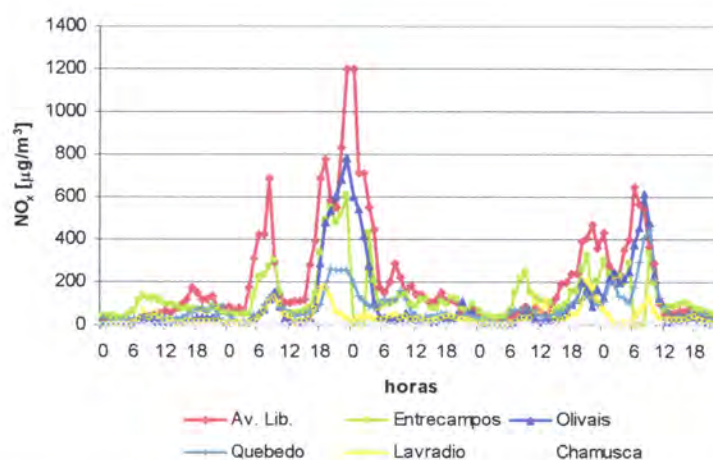


Figura 110 - Concentrações de NO_x registadas nas estações dos Olivais, Entrecampos, Av. Liberdade, Quebedo, Lavradio e Chamusca, 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003

Destaca-se o facto das concentrações de NO_x não terem diminuído após o pico das 21 UTC, no dia 30 o que naturalmente se deveu à instalação da crista. No dia 28 tem dois picos de tráfego, mas o do fim do dia parece coincidir com o das partículas.

Esta última análise permite inferir que o aumento das partículas no dia 30, logo após a madrugada, não se devem ao tráfego, foi um caso de poluição à escala regional uma vez que as concentrações na Chamusca também aumentaram.

4.2.1.5.5 Resumo

O episódio de 28 a 31 de Dezembro de 2002 foi escolhido porque foi caracterizado sinopticamente pela passagem de superfícies frontais que à partida originam uma lavagem da atmosfera.

Os dois períodos em que se registaram concentrações mais elevadas estão associados a uma crista anticiclónica, após a passagem da superfície frontal, embora no dia 30 a crista só se instale para o fim do dia.

No dia 28 observa-se uma crista a todos os níveis e ainda a diminuição da intensidade do vento à superfície e aos 850 hPa.

No dia 30 não é justificado meteorologicamente porque é que as concentrações de PM_{10} começam logo a aumentar desde a madrugada após a passagem da frente, e sem haver um decréscimo visivelmente significativo depois do pico de tráfego da manhã, porque o vento à superfície aumenta de intensidade até às 13 UTC e é de oeste e intenso aos 850 hPa, chove às 17 UTC e a crista só se instala ao fim do dia. O NO_x tem um comportamento que se coaduna melhor com as condições meteorológicas, que de facto são menos favoráveis a dispersão a partir da tarde. Deve-se tratar de um caso de poluição à escala regional dado que as concentrações na Chamusca também aumentaram.

A aproximação das superfícies frontais é indubitavelmente a responsável pela diminuição das concentrações nos dias 29 e 31. As concentrações são muito baixas ou próximas de zero quando a frente acaba de passar. No caso da última frente que ondula e só passa no dia 1 à tarde, as concentrações passaram a zero a partir da 01 UTC desse dia, porque ocorreu precipitação.

Estas superfícies frontais não são das mais típicas em que se verifica um pós-frontal activo, com vento de noroeste.

4.2.1.6 Intercomparação dos episódios descritos

Dada a descrição exaustiva efectuada anteriormente urgiu a necessidade de se elaborar uma tabela com um resumo dos principais resultados obtidos na análise anterior (Tabela 8).

Tabela 8 – Resumo das condições que predominaram durante cada episódio

Episódio	Sit.Sinóptica Superfície	Sit.Sinóptica 500hPa	Condições existentes	Origem partículas
5 a 8 Novembro 1999	Anticiclone (Circulação E)	Crista Anticiclónica	<ul style="list-style-type: none"> • Circulação aos 850 hPa do N África (Anticiclone) (5 a 7) • Aumento de [NOx] e [PM₁₀] (9 e 21 UTC) (dia 8) 	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte (N África) • Local (tráfego)
26 a 28 Fevereiro 2000	Anticiclone localizado na Europa Central	Crista Anticiclónica + Vale nas Canárias	<ul style="list-style-type: none"> • Anticiclone localizado entre Europa Central e Mediterrâneo (diversos níveis) com circulação pelo N África • Aumento [NOx] e [PM₁₀] • Vento fraco e variável (superfície) (dias 25/26) • Diminuição intensidade vento (850 hPa) (dia 25) 	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte (N África) • Local (tráfego)
30 Maio a 1 Junho 2002	Vale do N África + Anticiclone no Atlântico em crista até aos Alpes	Crista Anticiclónica	<ul style="list-style-type: none"> • Região depressionária no N África (superfície, 925 e 850 hPa) + anticiclone Mediterrâneo aos 850 hPa • Aumento da intensidade do vento à tarde • Altura da camada mistura elevada às 12 UTC • Aumento [NOx] e [PM₁₀] 	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte (N África) • Local/Regional (tráfego)
23 a 25 Julho 2002	Anticiclone no Atlântico em crista até G. Biscaia + d.o.t.	Crista Anticiclónica	<ul style="list-style-type: none"> • Anticiclone com circulação do Continente Europeu (Superfície, 925 e 850 hPa) • Inversão de subsidência à superfície (dias 24 e 25, 00 UTC) • Aumento intensidade vento a partir da tarde (Nortada) • Aumento concentrações das partículas grosseiras (24 a 26) 	Transporte (Incêndios PI)
28 a 31 Dezembro 2002	Superfícies frontais alternadas com cristas	Vales alternados com cristas	<ul style="list-style-type: none"> • Cristas pós-frontais • Aumento das concentrações após passagem frentes • Diminuição das concentrações antes e no momento da passagem das frentes • Diminuição intensidade vento (superfície e 850 hPa) (dia 28) 	Local/Regional

Refira-se ainda que:

- todos os episódios têm em comum a existência de uma crista em altitude (predictor de má qualidade do ar) (EPAA, 2003);
- os episódios de partículas oriundas do Norte de África são explicados pelos diversos campos aos 850 hPa;
- admitindo que o aumento das concentrações de partículas de 23 a 25 de Julho de 2002 se deveu ao transporte de partículas do interior da Península Ibérica dos incêndios florestais; então, este episódio acabou por não ser um exemplo inócuo para analisar os efeitos de uma depressão de origem térmica;
- o episódio de 28 a 31 de Dezembro de 2002 caracterizado pela passagem sucessiva de superfícies frontais não representa a situação mais típica em que se verifica um pós-frontal activo, com vento de noroeste.

5 CONCLUSÕES

Uma vez que a quarta estação da rede da qualidade do ar só entrou em funcionamento em Julho de 99, o período estudado foi de Julho de 1999 a Dezembro de 2003. No entanto, na análise por estação do ano e consequentemente mensal restringiu-se o período de análise a Dezembro de 1999 a Novembro de 2003.

A Av. da Liberdade é das quatro estações da cidade a que apresenta concentrações mais elevadas (50% das concentrações registadas estão acima do valor limite), o que se coaduna com o facto de ser uma estação de tráfego e a estação dos Olivais, urbana de fundo, é a que apresenta concentrações mais baixas (75% dos dados estão abaixo de $40 \mu\text{m}/\text{m}^3$). Por esse facto e ainda por apresentar uma correlação elevada com as outras três estações escolheu-se os Olivais como estação de referência.

Quando se analisa o comportamento da série de dados da estação dos Olivais, verifica-se que o ano de 2001 foi o ano em que se registaram as concentrações médias e máximas mais elevadas. O mês de Abril é o mês em que as concentrações são mais baixas e Setembro e Março os meses em que as concentrações são mais elevadas (50 a 75% dos valores de concentração mais elevados ocorreram nestes meses). A análise por estação do ano permite constatar que o valor da mediana é maior no Inverno (em que se verifica uma grande variabilidade nas concentrações) e muito semelhante ao do Outono e o mais baixo é na Primavera. As concentrações mais elevadas de PM_{10} estão associadas predominantemente a ausência de vento (calma) ou a vento do quadrante leste. Estes casos acontecem predominantemente na presença de um anticiclone à superfície (calma e vento do quadrante leste), de um vale que se estende do Norte de África (sueste) ou de uma depressão que devido à

sua posição origina uma circulação de sueste para a região de Lisboa. De Abril a Julho as concentrações são mais baixas associadas a vento predominante de noroeste. As concentrações mais altas de PM_{10} estão associadas as alturas de camada de mistura simultaneamente baixa e alta.

Verificou-se que de Julho de 1999 a Novembro de 2003, 57% dos episódios duraram de dois a quatro dias. A análise associada ao tipo de situação sinóptica classificada subjectivamente originou as seguintes considerações:

- a situação sinóptica que ocorreu, no período de quatro anos, com maior frequência é a que está associada a um anticiclone à superfície;
- no Inverno a maior percentagem de episódios está associada a um anticiclone à superfície,
- as situações sinópticas associadas a um vale que se estende do Norte de África e a uma depressão de origem térmica ocorrem poucas vezes, com maior frequência no Verão, mas a probabilidade de ocorrer um episódio associado a essas situações é significativa;
- na Primavera a situação sinóptica que ocorre com maior frequência é a que está associada a uma depressão à superfície, mas origina uma percentagem pequena de episódios;
- ocorrem menos episódios no mês de Abril e mais episódios no mês de Setembro e concomitantemente mais episódios no Outono e menos episódios na Primavera;
- a situação sinóptica à qual estão associadas maiores concentrações de PM_{10} é a que representa um vale que se estende do Norte de África (mediana mais elevada);
- a situação sinóptica associada à passagem de superfícies frontais é a que origina concentrações de PM_{10} mais baixas (mediana mais baixa).

A utilização da classificação sinóptica automática, baseada predominantemente na circulação à superfície, apresenta a vantagem de não apresentar subjectividade e ser mais prática para períodos climatológicos mais longos, uma vez que a classificação subjectiva torna-se neste caso extremamente morosa.

Os modelos de estatística utilizados neste trabalho identificam diferentes variáveis meteorológicas como contribuintes para a concentração de PM_{10} à superfície:

- o modelo de regressão linear múltipla indica as variáveis temperatura aos 925 hPa e o geopotencial aos 500 hPa como as mais relevantes;
- o modelo CART aponta como variável com maior peso a velocidade do vento à superfície, seguido da humidade relativa aos 850 e 925 hPa e num patamar inferior a altura da camada de mistura e a componente zonal do vento;
- a análise de componentes principais, em que se considerou apenas as variáveis meteorológicas à superfície, infere que a componente principal 2 poderá ser um indicador da concentração de PM_{10} à superfície e está associada ao vento, e em que a velocidade do vento representa a maior contribuição, seguido da componente zonal do vento.

Comparando os resultados destes modelos com os resultados de toda a análise efectuada com este trabalho, verifica-se que:

- a utilização dos campos da humidade relativa não permitiu tirar ilações;
- o campo da temperatura aos 850 hPa foi nos casos estudados, mais importante que aos 925 hPa, o que pode ter sido devido ao facto dos episódios estudados (excepto o de 28 a 31 de Dezembro de 2002) terem tido uma forte influência de transporte ao nível 850 hPa;
- o geopotencial aos 500 hPa é de facto relevante. Em todos os episódios estudados existe uma crista em altitude.

Relativamente às outras variáveis (velocidade do vento, componente zonal do vento e altura da camada de mistura) apresentam de facto um papel importante na interpretação dos valores de concentração de PM_{10} à superfície, mas não justificam por si só esses valores. Ou seja:

- um aumento da velocidade do vento não originou durante o episódio de 30 de Maio a 1 de Junho de 2002 uma diminuição da concentração de partículas. Noutro caso estudado, no episódio de 23 a 25 de Julho de 2002, a existência da nortada implicou uma diminuição, ao fim do dia, das concentrações de partículas.

- a utilização das componentes zonal e meridional do vento são relevantes para uma análise deste tipo. Verificou-se que concentrações elevadas de PM_{10} estão associadas a ventos do quadrante leste, enquanto que concentrações baixas estão associadas a ventos de noroeste.
- o conhecimento da altura da camada de mistura é fundamental nos estudos de dispersão, mas não permite tirar ilações sobre as concentrações de partículas à superfície porque, por exemplo, se verifica uma altura de camada de mistura alta quando há influência de uma massa de ar do Norte de África, situação que origina concentrações elevadas de partículas. Por outro lado, o mês de Abril apresenta a camada de mistura mensal mais elevada, corroborando com o facto de ser o mês em que as concentrações são mais baixas. Isso deve-se ao facto dos fenómenos convectivos serem nesse mês mais intensos.

Relativamente ao desempenho dos modelos constata-se que:

- as vantagens da utilização do modelo ALADIN, neste estudo, foram mais evidentes no episódio de 23 a 25 de Julho de 2002 pelo facto de se desenvolverem fenómenos de mesoscala. A depressão de origem térmica e as brisas (bem visíveis com o campo da advecção da temperatura aos 1000 hPa) foram bem identificadas. No que concerne aos restantes episódios, a utilização do campo do vento aos diversos níveis também se revelou bastante útil;
- Relativamente ao modelo ECMWF, os campos da pressão ao nível médio do mar e do geopotencial aos 850 hPa constituíram ferramentas essenciais para justificarem os episódios de 5 a 8 de Novembro de 1999, de 26 a 28 de Fevereiro de 2000 e de 30 de Maio a 1 de Junho de 2002, associados a um aumento de concentração de partículas por transporte, corroborados pelo modelo de retro-trajectórias. Os campos da advecção de temperatura e humidade tornaram-se pontualmente necessários, mas não imprescindíveis.

Com base no trabalho efectuado será importante no futuro desenvolver investigação relativamente à utilização das novas versões do modelo ECMWF (0.25 ° de resolução) e do ALADIN/Portugal (parametrizações físicas mais sofisticadas, nomeadamente na camada limite) para outras situações sinópticas e em diferentes épocas do ano; inclusivamente para a sua aplicação em modelos de gestão da qualidade do ar urbana, nomeadamente em Lisboa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcoforado, M.J. (1987). "Brisas Estivais do Tejo e do Oceano, na Região de Lisboa", Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia, XXII, 43, 71-112.

Almeida, S. (2004). "Composição e origem do aerossol atmosférico em zona urbano-industrial". Dissertação de Doutoramento. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro

Alves, C. (1992). "A Meteorologia e os Incêndios Florestais - Interrupção da Circulação contomante da Península Ibérica e risco de Incêndios nas florestas", IM.

Aneja, V., Brittig, J., Kim, D. (2004) Ozone and other air quality related variables affecting visibility in the Southeast United States. *Journal of air and Waste Management Association*, 54, 681-688.

Artíñano, B., Querol, X., Salvador, P., Rodriguez, S., Alonso, D., Alastuey, A. (2001) Assessment of airborne particulate levels in Spain in relation to the new EU - Directive. *Atmospheric Environment*, 35, S43-S53.

Avila, A., Alarcón, M., Queralt, I. (1998). The chemical composition of dust transported in red rains – it's contribution to the biogeochemical cycle of a holm oak forest in Catalonia (Spain). *Atmospheric Environment*, 32 (2), 179-191.

Avila, A., Queralt, I., Alarcón, M. (1997). Mineralogical composition of African dust deliverde by red rains over Northeastern Spain. *Journal of Geophysical Research*, 102, D18, 21977-21996.

Barros, N., Borrego, C. (2003). Urban photochemical pollution in the Iberian Peninsula: Lisbon and Barcelona airsheds. *Journal of air and Waste Management Association*, 53, 347-359.

Belo, M. (2003). "Ferramentas de diagnóstico: Aplicação aos Modelos ALADIN e ECMWF". Parte 1 (Nota técnica 1/2003), IM

Belo, M. (2004). "Ferramentas de diagnóstico". Manual de Utilização. Parte 2, I.M., Janeiro.

Benito, R.V. (2001). "Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos. Caracterización del área del Golfo de Cádiz". Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias, Universidad de Valladolid.

Bergametti, G., Dulac, F., Tanré, D., Ménard, P., Desbois, M., Sutton, D. (1992). Assessment of the African airborne dust mass over the Western Mediterranean Sea using Meteosat data. *Journal of Geophysical Research*, 97, D2, 2489-2506.

Bergametti, G., Gomes, L., Gaussien, G., Rognon, P. and Coustumer, M. (1989). African dust observed over Canary Islands: Source-Regions identification and transport pattern for some summer situations. *Journal of Geophysical Research*, 94, D12, 14855-14864.

Bogo, H., Otero, M., Castro, P., Ozafrán, M., Kreiner, A., Calvo, E., Negri, R. (2003). Study of atmospheric particulate matter in Buenos Aires City. *Atmospheric Environment*, 37, 1135-1147.

Buchanan, C., Beverland, I., Heal, M. (2002). The influence of weather type and long-range transport on airborne particle concentrations in Edinburgh, UK. *Atmospheric Environment*, 36, 4343-5354.

Carlson, T., Prospero, J. (1972). The Large-Scale movement of Saharan air outbreaks over the Northern Equatorial Atlantic. *Journal of Applied Meteorology*, 11, 283-297.

Casmassi, J. (1987). "Development of an objective ozone forecast model for the South Coast Air Basin", 80th Annual Meeting of APCA (The Association Dedicated to Air Pollution Control and Hazardous Waste Management), New York, 21 a 26 Junho 1987.

Castanho, A., Artaxo, P. (2001). Wintertime and summertime São Paulo aerosol source apportionment study. *Atmospheric Environment*, 35, 4889-4902.

CCDR-LVT (2005). "Planos e programas para a melhoria da qualidade do ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo", Relatório Final, CCDR-LVT.

CE - Comissão Europeia (2005). "Proposta de Directiva do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à qualidade do ar ambiente e um ar mais limpo na Europa" (COM (2005) 447 final), Brussels, September 2004.

Chaloulakou, A., Kassomenos, P., Spyrellis, N., Demokritou, P., Koutrakis, P. (2003) Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, 37, 649-660.

CONCAWE (1999). "The Health Effects of PM 2.5 (including Ultra fines Particles)", Report nº99/60, Central Toxicology Laboratory, CONCAWE, Brussels.

Crespí, S.N., Artíñano, B., Cabal, H. (1995). Synoptic classification of the mixed-layer height evolution. *Journal of Applied Meteorology*, 34, 1666-1677.

D'Almeida, G. A., Schütz, L. (1983). Number, mass and volume distributions of mineral aerosol and soils of the Sahara. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22, 233-243.

Dayan, U., Miller, J., Heffter, J., Gutman, G. (1991). Dust Intrusion events into the Mediterranean Basin. *Journal of Applied Meteorology*, 30, 1185-1199.

Dayan, U., Rodnizk, J. (1999) The temporal behaviour of the atmospheric Boundary layer in Israel. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 830-836.

Diniz, A. L. (1951). "Apontamentos de meteorologia", S.M.N.

Dockery, D. W., Pope, C.A (1996). "Epidemiology of acute health effects: summary of time-series studies, in particles in our air: concentration and health effects", Wilson R., Spengler J.D. (editors), Cambridge - MA, Harvard University Press, USA.

Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris Jr., B.G., Speizer, F.E. (1993). "An association between air pollution and mortality in six U.S. cities", *New England Journal of Medicine*, 329, pp. 1753-1759.

Dulac, F., Tanré, D., Bergametti, G., Ménard, P., Desbois, M., Sutton, D. (1992) Assessment of the african airborne dust mass over the Western Mediterranean sea using meteosat data. *Journal of Geophysical Research*, 97, nº D2, 2489-2506.

Easter, R., Peters, L. (1994) Binary homogeneous nucleation: temperature and relative humidity fluctuations, nonlinearity and aspects of new particle production in the atmosphere. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 775-784.

EC – European Comission (2002) "Guidance on the Annexes to Decision 97/101/EC on Exchange of Information as revised by Decision 2001/752/EC", DG Environment, April 2002.

EC – European Comission (2004) "Second position paper on particulate matter-final draft" CAFE Working Group on Particulate Matter, Abril 2004.

ECMWF (2002). "MARS User Guide", ECMWF, June

ECMWF (2003). "Support for trajectories applications". OD/C/TAC/10/UM/DM/HM/228, March.

EPA (2003a). "Guidelines for developing an air quality (Ozone and PM_{2.5}) forecasting program", U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, North Carolina, EPA-456/R-03-002.

EPA (2003b). "Fourth External Review Draft of Air Quality Criteria for Particulate Matter", June, Vol.I e II, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. Research Triangle Park - NC. June 2003.

Ferreira, H. A. (1954). "Características das massas de ar em Portugal Continental", Tomo II, Serviço Meteorológico Nacional

Ferreira, H.A. (1965). "Climatologia Aeronáutica de Portugal. Aeroporto de Lisboa/Portela", Serviço Meteorológico Nacional

Frioud, M., Mitev, V., Matthey, R., Haberli, C., Richner, H., Werner, R., Vogt, S. (2003). Elevated aerosol stratification above the Rhine Valley under strong anticyclonic conditions, *Atmospheric Environment*, 37, 1785-1797.

Gaetano, A., Doherty, O., (2004) Temporal, Spatial and meteorological variations in hourly PM_{2.5} concentration extremes in New York city. *Atmospheric Environment*, 38, 1547-1558.

Gangoiti, G., Alonso, L., Navazo, M., Albizuri, A. Landa, G., Matabuena, M., Valdenebro, V., Maruri, M., Gardia, J., Millán, M. (2002) Regional transport of pollutants over the Bay of Biscay: analyses of an ozone episode under a blocking anticyclone in West and Central Europe. *Atmospheric Environment*, 36, 1349-1361.

Gillete, D.A., Blifford, I.H., Fenster, C.R. (1972). Measurements of aerosol size distribution and vertical fluxes of aerosols on land subject to wind erosion. *Journal of Applied Meteorology*, 11, 977-987

González, S.R. (2002). "Sources and processes affecting levels and composition of atmospheric particulate matter in the Western Mediterranean", Tese de Doutoramento, Institute of Earth Sciences "Jaume Almera" - CSIC, Universidade Politécnica da Catalunha, Espanha.

Hien, P., Bac, V. (2002). Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} and PM_{2.5-10} concentrations during the monsoon season in Hanoi, Vietnam. *Atmospheric Environment*, 36, 3473-3484

Holzworth, G.C. (1967). Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States. *Journal of Applied Meteorology*, 5, 1039-1044.

Husar, R.B., Husar, J.D., Martin, L. (2000). Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data. *Atmospheric Environment*, 34, 5067-5078.

Iglesias, M., Mahía, P., Muniategui, S., Fernández, E., Prada, D. (2005) Seasonal variation of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in A Coruña. Results of 4-year TSP and PM10 data record and interpretation, 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencian, Spain, 29-31 March

Instituto de Meteorologia (1999). "Boletim meteorológico diário", IM, Lisboa

Instituto de Meteorologia (2000). "Boletim meteorológico diário", IM, Lisboa

Instituto de Meteorologia (2001). "Boletim meteorológico diário", IM, Lisboa

Instituto de Meteorologia (2002). "Boletim meteorológico diário", IM, Lisboa

Instituto de Meteorologia (2003). "Boletim meteorológico diário", IM, Lisboa

IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.

Jaenicke, R. (1998). Atmospheric aerosol size distribution. In "Atmospheric Particles". Editado por Harrison and Van Grieken. IUPAC Séries on Analytical and Physical Chemistry of Environmental Systems. Vol.5. John Wiley & Sons. Chichester.

Jorba, O., Rocabenbosch, F., Baldasano, J. (2004) Cluster Analysis of 4-day back trajectories arriving in the Barcelona Área, Spain, from 1997 to 2002. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 887-900.

Kalkstein, L., Tan, G., Skindlov, J. (1987). An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 717-727.

Kallos, G., Kassomenos, P., Pielke, R. (1993) Synoptic and mesoscale weather conditions during air pollution episodes in Athens, Greece, *Boundary Layer Meteorology*, 62, 163-184.

Kassomenos, P., Sindosi, O., Lolis, C., Chaloulaki, A. (2003). On the relation between seasonal synoptic circulation types and spatial air quality characteristics in Athens, Greece. *Journal of Air Waste Management Association*, 53, 309-324.

Katsoulis, B. (1996) The relationship between synoptic, mesoscale and microscale meteorological parameters during poor air quality events in Athens, Greece. *The Science of The Total Environment*, 181, 13-24.

Kukkonen, J., Sokhi, R., Pohjola, M., Luhana, L., Kitwiroon, N., Fragkou, E., Rantamaki, M., Berge, E., Odegaard, V., Slordal, L., Denby, B., Finardi, S. (2005) Analysis of local-scale PM₁₀ air pollution episodes in four european cities with extended numerical analysis for London using MM5, 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain, 29-31 March

Lopes, M.J., Monteiro, M.I., Moreira, N. (2001). "Manual de Acesso a informação meteorológica disponível no Instituto de Meteorologia e no ECMWF para utilizadores do VPI", Centro de Vigilância, Previsão e Informação., Departamento de Vigilância Meteorológica, Instituto de Meteorologia

Loÿe-Pilot, M., Martin, J., Morelli, J. (1986). Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmosphere input to the Mediterranean. *Nature*, 321, 427-428.

Mendes, M.T., Trigo, R.M. and Da Camara, C.C. (2002) Padrões de circulação atmosférica para Portugal Continental (1881-1995) in: Garcia, F.G. & Valero, J.L.B. (Ed.), 3^a Assembleia Luso Espanhola de Geodesia e Geofísica – Valencia 2002. UPV, Valência. pp. 961-964.

Pope, C.A., Dockery, D.W., Schwartz, J. (1995). "Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution", *Inhaleable Toxicology*, 7, pp. 1-18

Prospero, J., Carlson, T. (1972). Vertical and areal distribution of Saharan Dust over the Western Equatorial North Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 77, 27:5255-5265.

Pueschel, R. (1995). Atmospheric Aerosols. In "Composition, chemistry, and climate of the atmosphere (Industrial Engineering). Editado por Hanwant B. Singh. John Wiley & Sons. USA

Raes, F., Van Dingenen, R., Vignati, E., Wilson, J., Putaud, J., Seinfeld, J., Adams, P. (2000). Formation and cycling of aerosols in the global troposphere. *Atmospheric Environment*, 34, 4215-4240.

Reiff, J., Forbes, G., Spieksma, F., Reynders, J. (1986). African dust reaching Northwestern Europe: a case study to verify trajectory calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 25, 1543-1567.

Rodriguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., Kakaliagou, O. (2001) Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment*, 35, 2433-2447.

Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Mantilla, E. (2002) Origin of high summer PM₁₀ and TSP concentrations at rural sites in Eastern Spain, *Atmospheric Environment*, 36, 3101-3112.

Santo, F.E. (1997). "O Clima de Portugal Continental, Contribuição para o Programa de Acção Nacional de Combate à Desertificação", I.M.

Savoie, D., Prospero, J., Saltzman, E. (1989) Non-sea-salt sulfate and nitrate in trade wind aerosols at Barbados: evidence for long-range transport. *Journal of Geophysical Research*, 94, nº D4, 5069 – 5080

Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (1998). "Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change", John Wiley & Sons Inc. Wiley Interscience. U.S.A.

Silva, N. (1951). "Meteorologia Sinóptica", Cap.3, Serviço Meteorológico Nacional

SNPS (2003). "Análise das épocas de fogos florestais de 2000, 2001 e 2002". Divisão de Riscos Naturais, Departamento de Prevenção e Protecção das populações, Serviço Nacional de Protecção Civil.

Sokhi, R., Baklanov, A. (2005). Enhancing meso-scale meteorological modelling capabilities for air pollution and dispersion applications (COST 728) 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencian, Spain, 29-31 March 2005

Spengler, J., Wilson, R. (1996). "Particles in our air: concentrations and health effects", Harvard University Press, U.S.A.

Tente, H. (2005). "Impacte das partículas em suspensão sobre a saúde humana: uma abordagem multidisciplinar para a cidade de Lisboa", Tese de Mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Portugal

Trigo, R., Camara, C. (2000). Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal. *International Journal of Climatology*, 20, 1559-1581.

Umbria, A., Gervilla, J., Galán, M., Valdés, R. (1999). "Caracterización de partículas", Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente.

Vardoulakis, S., Kassomenos, P. (2005) Comparison of factors influencing PM₁₀ levels in Athens (Greece) and Birmingham(UK), 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, Spain, 29-31 March 2005

- Vega, E., Reyes, E., Ruiz, H., Garcia, J., Sánchez, G., Villa, G., González, U. (2004) Analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere of México City during 2000-2002. *Journal of air and Waste Management Association*, 54, 786-798.
- Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Cuevas, E., Rodriguez, S. (2002). Influence of African dust on the levels of atmospheric particulate in the Canary Islands air quality network. *Atmospheric Environment*, 36, 5861-5875.
- Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Menéndez, M. (2003) *Atmospheric Environment*, 37, 2879 – 2891.
- Wang, C., Wan, C., Wei, C. (1997). An assessment of source contributions to ambient aerosols in Central Taiwan. *Journal of air and Waste Management Association*, 47, 501-509.
- Warneck, P. (1987). "Chemistry of the natural atmosphere", International Geophysics Series, vol.41. Academic Press, Inc. U.S.A.
- WHO (2000). "Air Quality Guidelines for Europe". Regional Office for Europe of the World Health Organization, World Regional Publications, European Series, N°91, Copenhagen, Denmark
- WHO (2002). Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine particulate matter for use in epidemiological studies, Published on behalf of European Commission and World Health Organization, EUR 20238 EN.
- WHO (2003). Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark
- Wilson, W. E., Suh, H. H. (1997). Fine particles and coarse Particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies. *Journal Air Waste Management Association*, 47, 1238-1249.
- WMO (1978). "Compendium of Meteorology", Vol.I Part 3 – Synoptic Meteorology, WMO N° 364. Secretariat of the World Meteorological Organisation. Geneva
- Wolff et al (1977). An investigation of long range transport of ozone across the midwestern and eastern United States. *Atmospheric Environment*, 11, 797-802.
- Yang, K. (2002). Spatial and seasonal variation of PM₁₀ mass concentrations in Taiwan. *Atmospheric Environment*, 36, 3403-3411

ANEXO A. Resumo do modelo das retro-trajectórias(KNMI)

Tabela A1 - Resumo dos resultados do modelo de retro-trajectórias (KNMI), referentes ao episódio de 5 a 8 Novembro de 1999

Origem		Local		Niv(hPa)	Dia	Hora	Trajecto Principal	Percorso Continental	Destino		
Massa de ar									Local	Niv(hPa)	Dia
Polar marítima	Canadá	674.2					Canadá / Atlântico / PI (Corunha)	42h Canadá+36h PI	Olivais	700	
Ártica marítima	Gronelândia	368.9					Atlântico / PI (Cabo Carvoeiro)	40h PI+8h Gronelândia	Olivais	850	
Marítima latitudes médias	NE Madeira	950.3	30	0			Atlântico / PI (Andaluzia)	60h PI	Olivais	925	4
Polar marítima	Costa Canadá	926.2					Atlântico / PI (Pais Basco)	42h PI	Olivais	1000	
Tropical marítima	Cabo Verde	590.4					Atlântico (Canárias / E Madeira)	< 3 h (chegada)	Olivais	700	
Tropical marítima	S Canárias	695.7					Atlântico (W Canárias / E Madeira)	< 3 h (chegada)	Olivais	850	
Polar marítima	E Islândia	359.9	31	18			Atlântico (S Açores / S Madeira)	< 3 h (chegada)	Olivais	925	5
Marítima latitudes médias	W Cabo Mondego	1011.3					Atlântico (C.Mancha) / Europa(Pirineús) /Mediterrâneo/PI(Andaluzia)/Atlântico/PI(Sul)	14h pirineús+6h PI	Olivais	1000	
Tropical continental	Mauritânia	645.1					África (Mauritânia) / Atlântico (Canárias / E Madeira)	21h África	Olivais	700	
Tropical marítima	SW Canárias	641.3					Atlântico (Canárias / E Madeira)	< 3 h (chegada)	Olivais	850	
Tropical marítima	SW Canárias	824.1	1	12			Atlântico (Canárias / E Madeira)	< 3 h (chegada)	Olivais	925	6
Marítima latitudes médias	N Açores	387					Atlântico / PI (Cabo Carvoeiro)	3h PI+12h PI	Olivais	1000	
Tropical marítima	Costa Mauritânia	602.1					Atlântico (Canárias / E Madeira)	< 3 h (chegada)	Olivais	700	
Tropical continental	Saara	850.6					África (Sara Mali / Mauritânia / Sara Ocidental) / Atlântico (Canárias / E Madeira)	79h África+2h PI	Olivais	850	
Polar marítima	S Gronelândia	429.8	2	12			Atlântico (S Açores / Canárias / E Madeira)	< 3 h (chegada)	Olivais	925	7
Tropical marítima	W Canárias/S Açores	789.9					Atlântico (S Madeira) / PI (Aveiro)	26 h PI	Olivais	1000	
Tropical marítima	W Sara Ocidental	571.2					Atlântico / África (Saara Ocid. /Mauritânia)/Atlântico (Canárias/Madeira)/PI (Corunha)	42h África+14h PI	Olivais	700	
Polar marítima	S Gronelândia	699.8					Atlântico (Açores / W Canárias / Madeira) / PI (Cantábricos)	15h PI	Olivais	850	
Polar marítima	S Canadá	839.2	3	18			Atlântico (Costa Irlanda / Bretanha) / PI (Cantábricos)	18h PI	Olivais	925	8
Polar marítima	SW Gronelândia	900.5					Atlântico / PI (Cantábricos)	54h PI	Olivais	1000	
Polar marítima	NW Açores	673.4					Atlântico (W Canárias / W Madeira) / PI (Cantábricos)	11h PI	Olivais	700	
Marítima latitudes médias	Açores	644.5					Atlântico (W Canárias / Madeira) / PI (Cantábricos)	18h PI	Olivais	850	
Polar marítima	SE Canadá	825.9	4	15			Atlântico (S I.Britânicas) / Europa (Normandia / Pais Basco)	45h Europa	Olivais	925	9
Ártica marítima	Costa Gronelândia	607.3					Atlântico (Costa Irlanda / Bretanha) / PI (Pais Basco)	48h PI	Olivais	1000	

Tabela A2 - Resumo dos resultados do modelo de retro-trajectórias (KNMI), referentes ao episódio de 26 a 28 Fevereiro de 2000

Origem				Trajecto Principal		Percurso Continental	Destino		
Massa de ar	Local	Nlv(hPa)	Dia	Hora			Local	Nlv(hPa)	Dia
Tropical marítima	E Bermudas	925			Atlântico (I.Britânicas / Golfo Biscalia) / PI (Pirineus)	28h PI	Olivais	700	
Marítima latitudes médias	Costa E EUA	467.4	20	18	Atlântico (E Canadá / I. Britânicas) / Europa (Normandia / Pirineus) / Mediterrâneo / PI (costa sul)	12h França+24h PI	Olivais	850	25
Polar marítima	E Canadá	539.7			Atlântico (I.Britânicas)/Europa(Bretanha)/Mediterrâneo/PI (costa sul)	24h França+24 PI	Olivais	925	
Marítima latitudes médias	NW PI	791			Atlântico / PI (Corunha)	96h PI	Olivais	1000	
Polar marítima	E Canadá	399.2			Atlântico (W I.Britânicas / Golfo Biscalia) / PI (Cantábricos) / Mediterrâneo / África (Marrocos) / Atlântico	10h PI+24h África	Olivais	700	
Polar marítima	E Canadá	640.7	21	12	Atlântico (I.Britânicas) / Europa (Normandia) / Mediterrâneo / África (Atlas) / PI (S Espanha)	15h França+12h África+34h PI	Olivais	850	26
Marítima latitudes médias	W Bretanha	737			Atlântico / Europa (Bretanha/Pirineus) / Mediterrâneo /PI (S Espanha)	36h França+34 PI	Olivais	925	
Marítima latitudes médias	NW Corunha	922			Atlântico / PI (Corunha)	102h PI	Olivais	1000	
Tropical continental	Sara Ocidental	470			África (Saara Ocidental / Marrocos) / Atlântico	60h África	Olivais	700	
Polar marítima	E Canadá	519.6	22	0	Atlântico (Ilhas Britânicas) / Cont.Europeu (Normandia) /PI (Sul)	18h França+54h PI	Olivais	850	27
Polar marítima	S Irlanda	649.2			Atlântico / Europa (Normandia / Madoço Central) / Mediterrâneo / PI (S Espanha)	24h França+47h PI	Olivais	925	
Polar marítima	N Açores	800.2			Atlântico / PI (Cantábricos / Cabo Carvoeiro) / Atlântico	36h PI	Olivais	1000	
Continental latitudes médias	Castela	357.8			PI-Mediterrâneo / Cont.Africano (Marrocos) / Atlântico	7h PI+13h África	Olivais	700	
Tropical continental	Saara Ocidental	953.7	23	9	Continente Africano / Atlântico (E Canárias / N Madeira / E Açores)	24h África	Olivais	850	28
Tropical continental	Saara	783.6			Cont.Afric. (Saara / Mali / Mauritânia / Saara Ocidental) / Atlântico (N Canárias / N Madeira / E Açores)	93h África	Olivais	925	
Tropical continental	Atlas	794.2			Continente Africano (Atlas / Marrocos) / Atlântico (N Madeira)	15h África	Olivais	1000	
Polar continental	EUA	723.3			Continente Americano (EUA / Canadá) / Atlântico	50h C.Americano	Olivais	700	
Polar continental	EUA	548.3	24	12	Continente Americano (EUA / Canadá) / Atlântico	50h C.Americano	Olivais	850	29
Ártica continental	Canadá	357.3			Continente Americano (Canadá) / Atlântico	48h C.Americano	Olivais	925	
Polar marítima	E Canadá	868.1			Atlântico (S Gronelândia)	8h PI	Olivais	1000	

Tabela A3 - Resumo dos resultados do modelo de retro-trajectórias (KNMI), referentes ao episódio 30 de Maio a 1 de Junho de 2002

Origem			Trajecto Principal			Percorso Continental	Destino		
Massa de ar	Local	Niv(hPa)	Dia	Hora			Local	Niv(hPa)	Dia
Continental latitudes médias	EUA	474.9			EUA / Atlântico (N Açores)	42h EUA	Olivais	700	
Polar continental	Canadá	375			Canadá / Atlântico (N Açores)	38h Canadá	Olivais	850	
Tropical marítima	SE Bermudas	988.7	24	15	Atlântico (N Açores) / PI (Nazaré)	12h PI	Olivais	925	29
Marítima latitudes médias	NW Açores	1015.6			Atlântico / PI (Finisterra) Atlântico/PI(Cabo Carvoeiro)	3h Espanha+2h Portugal	Olivais	1000	
Polar continental	Canadá	539.5			Canadá / Atlântico (N Açores)	21h Canadá	Olivais	700	
Polar marítima	S Gronelândia	636.4			Atlântico / PI (Cabo Mondego) / Mediterrâneo /PI (Sul)	15h+64h PI	Olivais	850	
Polar continental	Canadá	454.5	25	12	Canadá / Atlântico (N Açores)	< 3 h (chegada)	Olivais	925	30
Polar marítima	Costa Canadá	826.1			Atlântico / PI (Corunha)	< 3 h (chegada)	Olivais	1000	
Polar marítima	SE Canadá	467.9			Atlântico	< 3 h (chegada)	Olivais	700	
Polar marítima	W Irlanda	673.8			Atlântico / PI (Corunha) / Mediterrâneo / PI (Sul)	20h+45h PI	Olivais	850	
Marítima latitudes médias	NW Açores	752.2	26	12	Atlântico / PI (Cabo Carvoeiro)	12h PI	Olivais	925	31
Polar marítima	E Canadá	881.8			Atlântico (Golfo Biscaia)	< 3 h (chegada)	Olivais	1000	
Marítima latitudes médias	W Açores	520.3			Atlântico (Açores)	< 3 h (chegada)	Olivais	700	
Marítima latitudes médias	NW Corunha	859.2			Atlântico / PI (Corunha) / Mediterrâneo/PI (S Espanha)	23h+39h PI	Olivais	850	
Polar marítima	N Açores	708.9	27	15	Atlântico / PI (Cabo Carvoeiro) / Atlântico	6h PI	Olivais	925	1
Polar marítima	W Irlanda	941.1			Atlântico / PI (Cabo Carvoeiro)	< 3 h (chegada)	Olivais	1000	
Tropical marítima	NW Cabo Verde	525			Atlântico (W Canárias / E Madeira)	< 3 h (chegada)	Olivais	700	
Tropical continental	Marrocos	741.9			África / Atlântico	27h África	Olivais	850	
Marítima latitudes médias	W Corunha	690.4	28	12	Atlântico	< 3 h (chegada)	Olivais	925	2
Marítima latitudes médias	N Açores	932.2			Atlântico	< 3 h (chegada)	Olivais	1000	

Tabela A4 - Resumo dos resultados do modelo de retro-trajectórias (KNMI), referentes ao episódio de 23 a 25 de Julho de 2002

Origem			Trajecto Principal		Destino	
Massa de ar	Local	Nlv(hPa)	Dia	Hora	Percorso Continental	Local Nlv(hPa) Dia
Marítima latitudes médias	W Cabo Mondego	761.4			Atlântico / Pl (Sines) / Atlântico	Olivais 850
Continental latitudes médias	Interior Pl	706.6			Pl (Sines) / Atlântico / Pl (Setúbal) / Atlântico	Olivais 850
Marítima latitudes médias	NW Açores	781.7	17	0	Atlântico (N Açores)	Olivais 925
Marítima latitudes médias	Golfo da Biscaia	801.9			Atlântico	Olivais 1000
Tropical marítima	W Marrocos	809.2			Atlântico / Pl (Golfo Cadiz / Cantábricos) / Golfo Biscaia / Pl (Astúrias)	Olivais 850
Marítima latitudes médias	W Cabo Finisterra	974.5	18	12	Atlântico / Pl (Corunha) / Atlântico / Pl (Cabo Mondego) / (Astúrias)	Olivais 925
Polar marítima	N I. Britânicas	986.7			Atlântico / Pl (Nazaré)	Olivais 1000
Continental latitudes médias	S Pl	825.4			Atlântico (Irlanda) / Bretanha/Atlântico/Pl (Corunha)/Atlântico	Olivais 850
Marítima latitudes médias	Golfo Biscaia	993.4	19	12	Pl /Golfo Biscaia / Pl (Astúrias)	Olivais 925
Polar marítima	N Ilhas Britânicas	946.4			Atlântico	Olivais 1000
Polar marítima	S Islândia	637.4			Atlântico / Pl (Cantábricos)	Olivais 700
Polar marítima	NW Irlanda	568.9			Atlântico / Pl (Cantábricos)	Olivais 850
Polar marítima	S Islândia	721.7	20	12	Atlântico (I. Britânicas) / Bretanha / Atlântico / Pl (Astúrias)	Olivais 925
Marítima latitudes médias	NW Açores	969.6			Atlântico / Pl (Galiza)	Olivais 1000
Polar marítima	W Irlanda	679.8			Atlântico /Pl (Cantábricos) / Atlântico	Olivais 850
Polar marítima	SE Canadá	832.3	21	12	Atlântico / Pl (Astúrias)	Olivais 925
Marítima latitudes médias	W Açores	986.2			Atlântico	Olivais 1000

Tabela A5 - Resumo dos resultados do modelo de retro-trajectórias (KNMI), referentes ao episódio de 28 a 31 de Dezembro de 2002

Origem		Trajecto Principal		Destino	
Massa de ar	Local	Niv(hPa)	Dia	Hora	
Polar marítima	W Irlanda	988.5		Atlântico	
Marítima latitudes médias	E EUA	964		Atlântico (N Açores)	
Árctica marítima	N Islândia	992.4	22	Atlântico (E Gronelândia) / W Irlanda	
Polar marítima	SW Islândia	935.6		Atlântico (NE Açores)	
Polar marítima	Costa Canadá	965.8		Atlântico (N Açores)	
Polar marítima	Estreito Davis	609.3		Atlântico (NE Açores)	
Árctica marítima	Baía de Baffin	514.2	23	Atlântico / Gronelândia	
Árctica continental	Canadá	508.3		Canadá / Gronelândia	
Árctica continental	Gronelândia	641.1		Gronelândia / Atlântico	
Tropical marítima	E Bermudas	901.6		Atlântico (N Açores)	
Polar marítima	NW Açores	546.6	24	Atlântico	
Polar marítima	SE Gronelândia	852.9		Atlântico (NE Açores)	
Polar continental	Canadá	565.2		Atlântico	
Polar continental	Canadá	782.3	25	Atlântico	
Marítima latitudes médias	SW Açores	400.5		Atlântico (S Açores/W Canárias/W Madeira)	
Polar continental	Canadá	457.3		Atlântico (S Açores)	
Polar continental	Canadá	543.8	26	Atlântico (S Açores)	
Polar marítima	Baía Hudson	846.9		Atlântico (S Açores)	
Tropical marítima	SE Bermudas	908.5		Atlântico (NW Madeira)	
Tropical marítima	W Canárias	888.2		Atlântico (W Madeira)	
Marítima latitudes médias	NW Madeira	1004.5	27	Atlântico (Madeira)	
Tropical marítima	W Canárias	1009.4		Atlântico (NW Madeira)	

ANEXO B. Campos dos modelos ECMWF e ALADIN

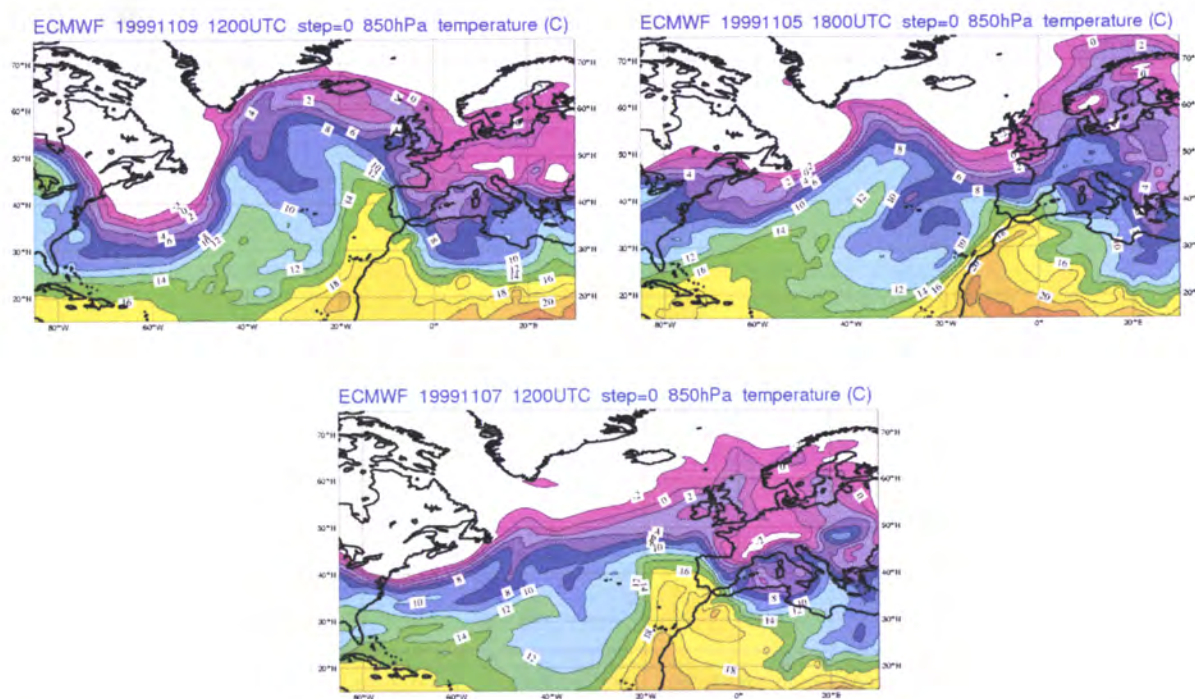


Figura B1 - Análise do campo da pseudo-temperatura potencial do termómetro molhado aos 850 hPa (ECMWF), referente ao episódio de 5 a 8 de Novembro de 1999

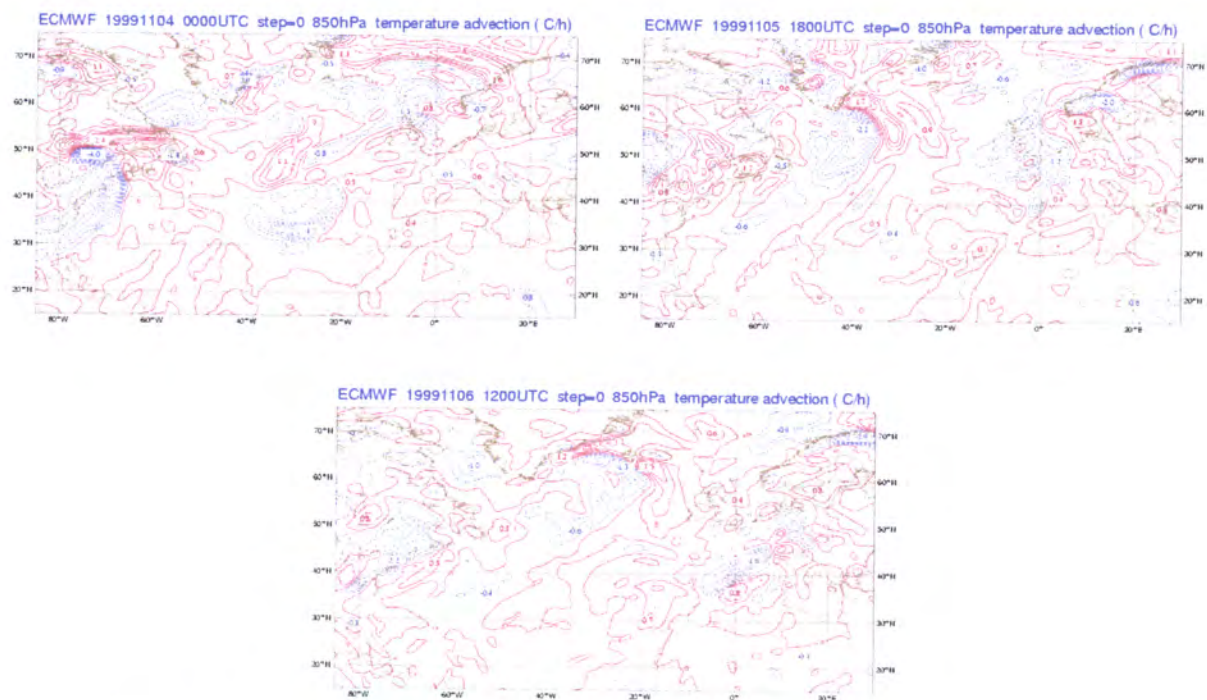


Figura B2 – Análise do campo da advecção de temperatura aos 850 hPa (ECMWF), referente ao episódio de 5 a 8 de Novembro de 1999

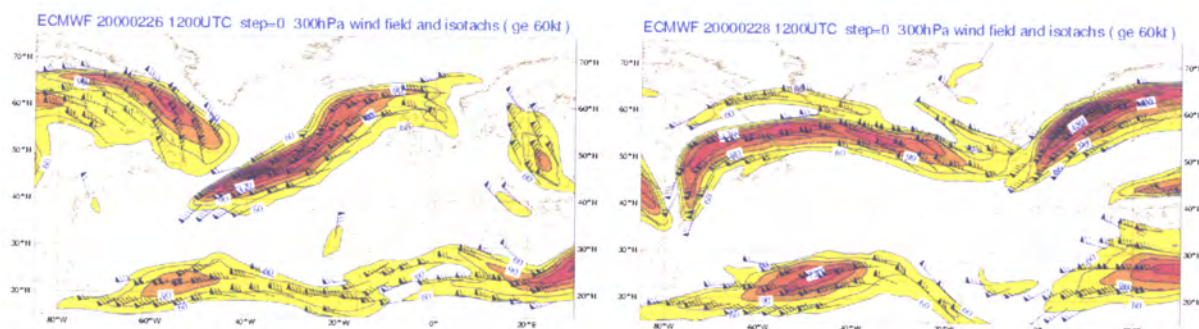


Figura B3 – Análise do jacto aos 300 hPa (ECMWF), referente ao episódio de 26 a 28 de Fevereiro de 2000

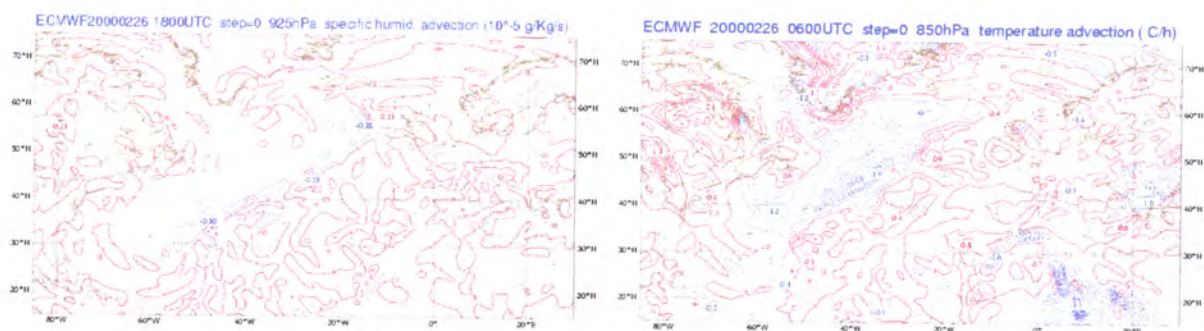


Figura B4 - Análise do campo da advecção de humidade aos 925 e 850 hPa (ECMWF), referente ao episódio de 26 a 28 de Fevereiro de 2000

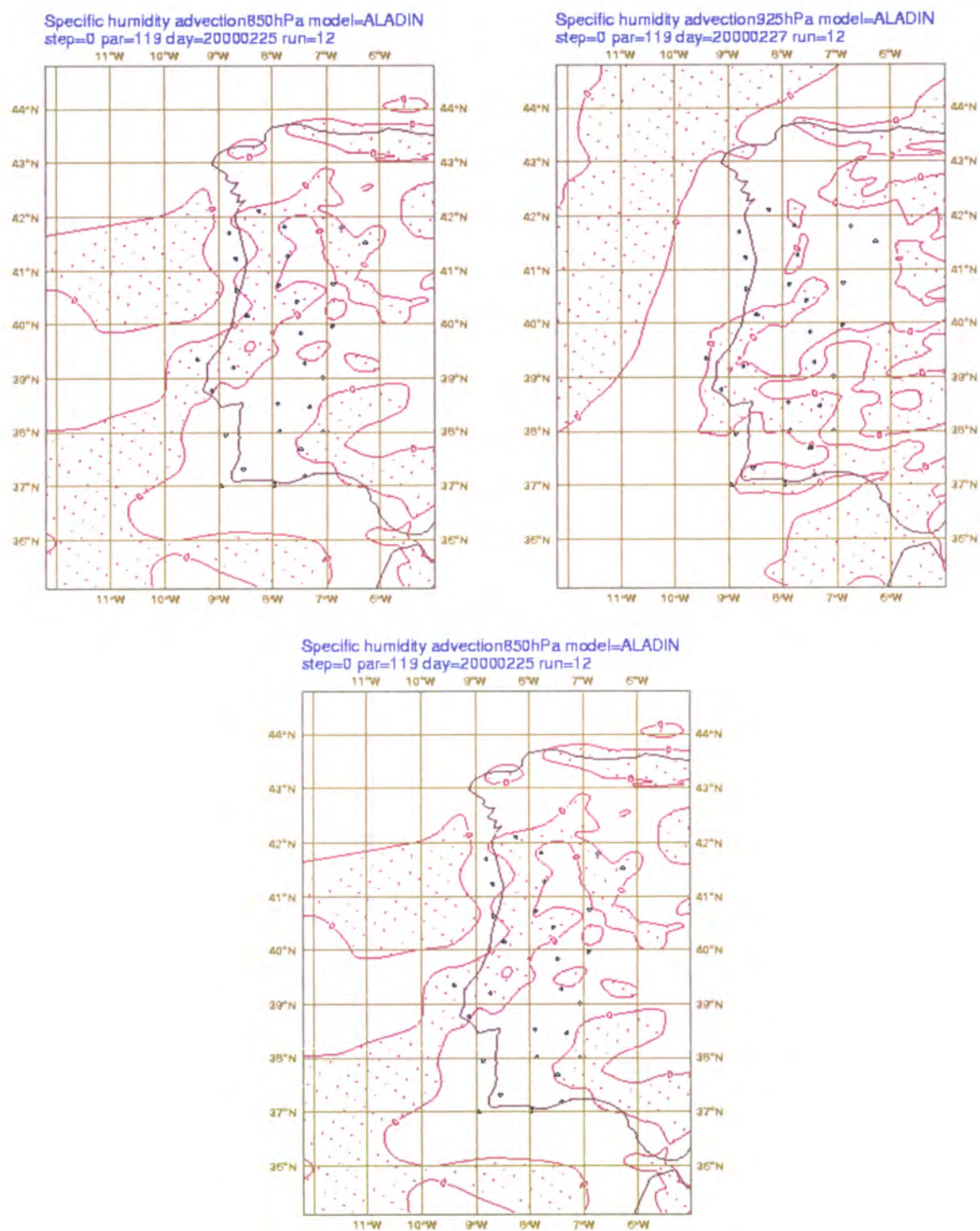


Figura B5 - Análise do campo da advecção de humidade aos 850 hPa (ALADIN), referente ao episódio de 26 a 28 de Fevereiro de 2000

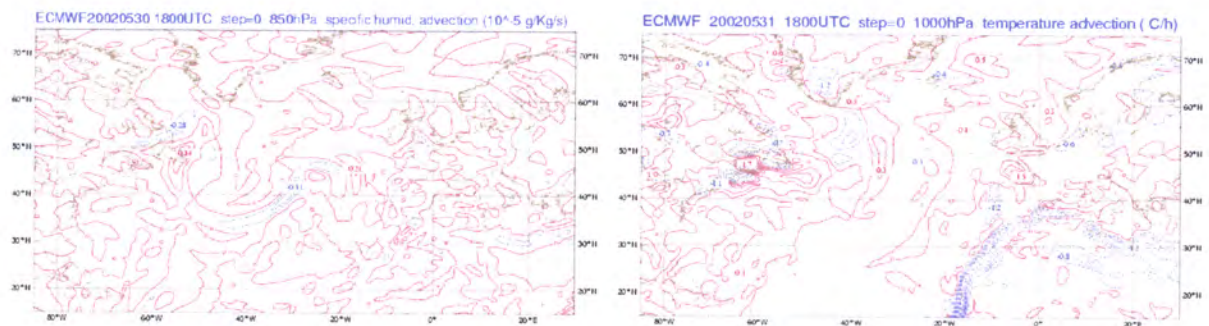


Figura B6 - Análise do campo da advecção de humidade aos 850 hPa (ECMWF), referente ao episódio de 30 de Maio a 1 de Junho de 2002

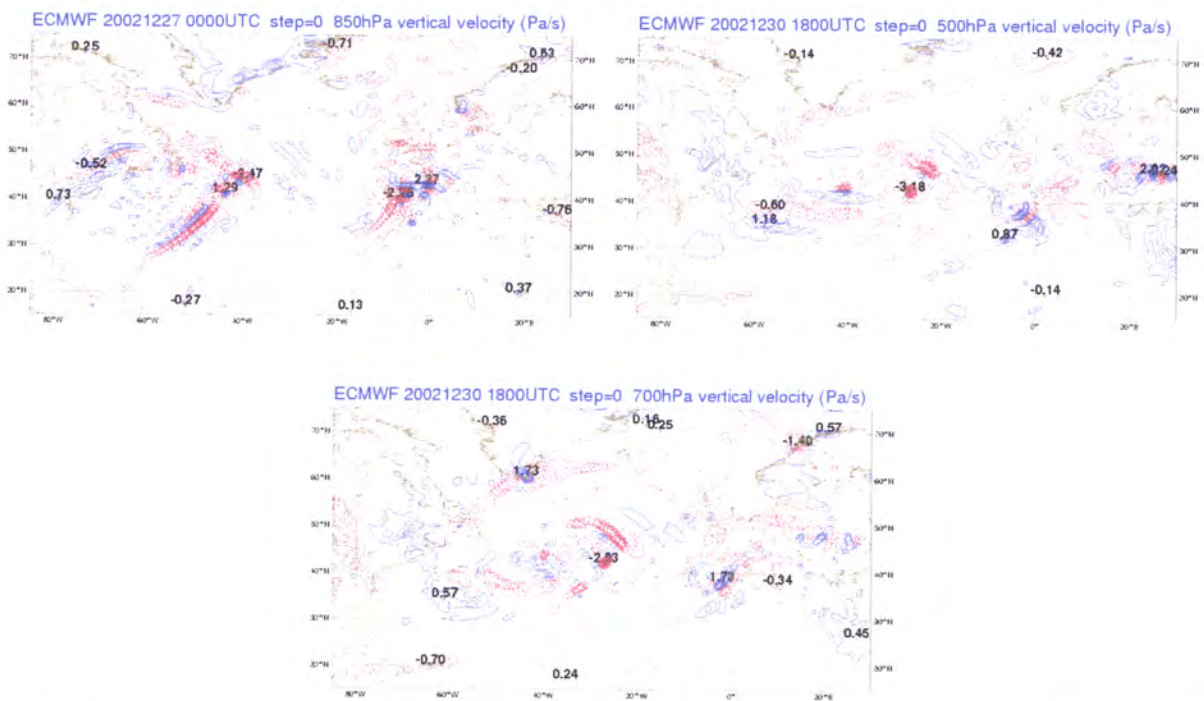
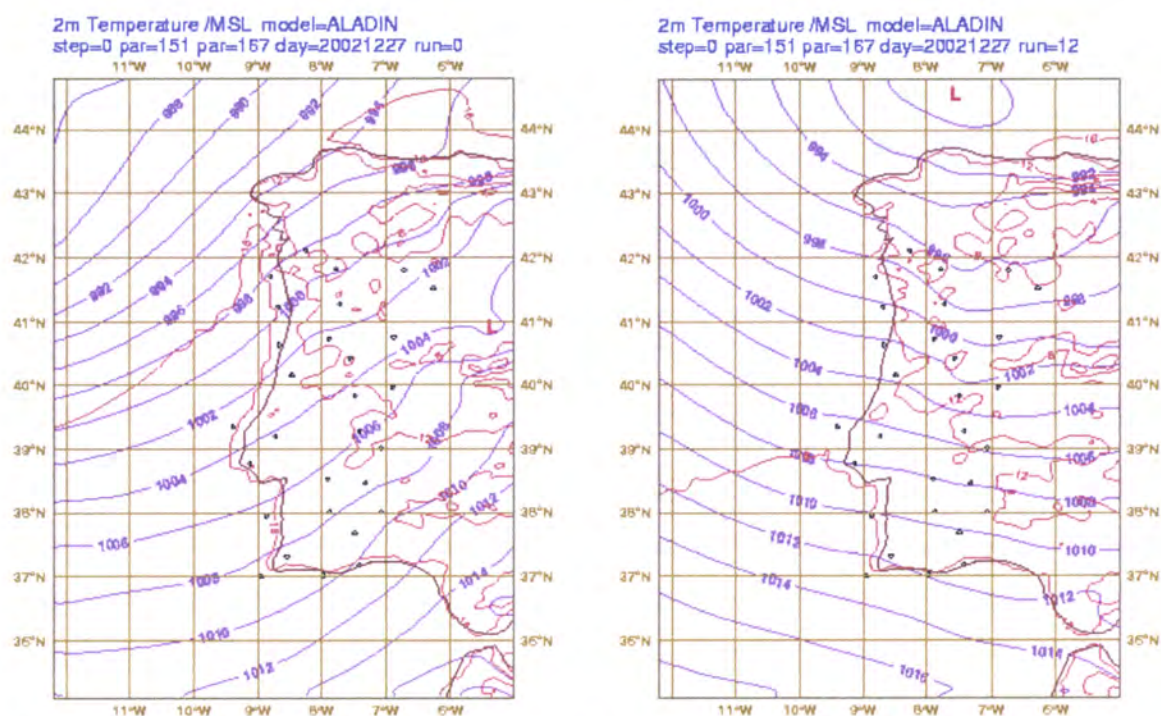


Figura B7 - Análise do campo da velocidade vertical aos 850 hPa (ECMWF), referente ao episódio de 28 a 31 de Dezembro de 2002



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição contínua dos aerossóis atmosféricos em número, em superfície e em volume <i>versus</i> tamanho das partículas. A distribuição em número da gama de partículas 0-0.5 μm encontra-se destacada na figura do interior (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998).....	25
Figura 2 - Distribuição do tamanho das partículas expressa em função logarítmica (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998).....	25
Figura 3 – Distribuição típica do número, superfície e volume do aerossol urbano (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998).....	26
Figura 4 – Distribuição em número para diferentes ambientes (próximo de uma auto-estrada, urbano médio, urbano de fundo e de fundo não urbano) (adaptado de Tente, 2005 e Seinfeld e Pandis, 1998).....	27
Figura 5 – Distribuição do tamanho dos aerossóis, em volume, próximo de uma fonte de emissão (auto-estrada) e em condições médias urbanas (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998).....	28
Figura 6 – Distribuição do tamanho em volume, medido no tráfego, mostrando as partículas finas e grosseiras e os modos de nucleação e de acumulação das partículas finas. Identificam-se também os mecanismos de transformação e de crescimento das partículas (nucleação, condensação e coagulação) (fonte: Wilson e Suh (1997); adaptado de Tente, 2005, Seinfeld e Pandis, 1998 e EPAb, 2003)	28

Figura 7 – Distribuição ideal da matéria particulada identificando o modo fino e grosseiro e as respectivas amostras por tipo de equipamento (adaptado de Wilson e Suh, 1997)	30
Figura 8 – Distribuição de tamanho em número observado na floresta boreal da Finlândia mostrando a estrutura trimodal das partículas finas. A concentração total do número de partículas foi 1011 partículas/ cm ³ (valor médio de 10 minutos) (fonte: adaptado da EPA), 2003).	30
Figura 9 - Tempo de residência das partículas na atmosfera em função do seu tamanho (fonte: Jaenicke, adaptado de Pueschel, 1995)	32
Figura 10 – Distribuição vertical da concentração de aerossóis (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998)	35
Figura 11 – Mapa representando as estações da qualidade do ar da CCDR-LVT e a estação meteorológica de Lisboa Gago Coutinho (IM) [Elaborado por Hugo Tente].....	52
Figura 12 - Tendência à série de PM ₁₀ das estações da qualidade do ar de a) Entrecampos, b) Olivais, c) Lavradio e d) Av. da Liberdade da rede CCDR-LVT (Julho de 1999 a Dezembro de 2003).....	62
Figura 13 – Gráfico de caixas referente às médias diárias de PM ₁₀ das estações da Av. da Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de Julho de 1999 a Dezembro de 2003	62
Figura 14 – Concentrações médias e máximas de PM ₁₀ na estação dos Olivais (valores médios diários), referentes ao período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003.	63
Figura 15 - Distribuição mensal das concentrações médias diárias de PM ₁₀ na estação dos Olivais, referente ao período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003 ..	64
Figura 16 - Histograma dos valores médios diários da concentração de PM ₁₀ referente ao mês de a) Março b) Abril, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	64
Figura 17 - Gráfico de caixas dos valores médios diários por estação do ano referente à estação dos Olivais, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003.	65

Figura 18 - Distribuição dos valores médios diários por estação do ano (padrão de sazonalidade) referente às estações dos Olivais, Entrecampos, Av. da Liberdade e Lavradio, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	65
Figura 19 - Concentrações médias diárias por dia de semana referentes às estações da AML Norte pertencentes à rede da CCDR-LVT, no período de Julho de 1999 a Dezembro de 2003	66
Figura 20 - Concentrações médias diárias por dia de semana referentes às estações da AML Sul e Chamusca pertencentes à rede da CCDR-LVT, no período de Julho de 1999 a Dezembro de 2003	66
Figura 21 - Perfil médio diário das concentrações para o período em estudo e por estação do ano nas estações a) Olivais e b) Av. da Liberdade, referente ao período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	67
Figura 22 - Histograma da distribuição pelo nº de dias dos episódios	68
Figura 23 - Frequência da ocorrência mensal de episódios de poluição, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	68
Figura 24 - Frequência de ocorrência de episódios de poluição, por estação do ano, no período de Julho de 1999 a Dezembro de 2003	69
Figura 25 – Frequência relativa de situações sinópticas e percentagem de ocorrência dos episódios em relação ao número total de dias para cada tipo de situação sinóptica, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	70
Figura 26 - Frequência relativa de situações sinópticas e percentagem de ocorrência de dias de episódios em relação ao número total de dias para cada tipo de situação sinóptica, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003, por estações do ano	71
Figura 27 – Frequência relativa dos tipos de tempo e percentagem de ocorrência de dias de episódios em relação ao número total de dias para cada tipo de tempo, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	72
Figura 28 - Gráfico de caixas das concentrações de PM_{10} associadas aos diferentes tipos de situações sinópticas, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	73

Figura 29 – Gráfico de caixas da estimativa da altura máxima da camada de mistura (Holzworth, 1967) associada a cada tipo de situação sinóptica, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	74
Figura 30 – Gráfico de caixas da altura da camada de mistura, por mês, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	75
Figura 31 – Gráfico de caixas da concentração de PM_{10} <i>versus</i> altura da camada de mistura, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003.....	75
Figura 32 - Concentração média de PM_{10} (estação dos Olivais) <i>versus</i> frequência de ocorrência do rumo do vento	76
Figura 33 – Gráficos de caixas, por mês, referentes aos valores da a) componente zonal e b) meridional do vento, na estação de Lisboa Gago Coutinho, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	77
Figura 34 –Gráficos de caixas , por mês, referentes aos valores da a) intensidade do vento, b) pressão ao nível médio do mar, c) humidade relativa e d) temperatura do ar, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	77
Figura 35 – Gráficos de caixa, por mês, referentes aos valores de concentração de PM_{10} , registados na estação dos Olivais, no período de Dezembro de 1999 a Novembro de 2003	78
Figura 36 – Resultados obtidos com a aplicação do modelo CART	80
Figura 37 - – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF), a) dia 4 e b) dia 5 de Novembro de 1999 (12UTC)	82
Figura 38 – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF), a) dia 6, 18UTC; b) dia 8, 12UTC e c) dia 9 (12 UTC) de Novembro de 1999	83
Figura 39 - Análise do campo do geopotencial aos 500 hPa (ECMWF), 5 de Novembro de 1999 (12 UTC).....	83
Figura 40 - Análise do campo do geopotencial aos 850 hPa (ECMWF) a) 4; b) 5; c) 6; d) 8; e) 9 (12 UTC) de Novembro de 1999.....	84
Figura 41 – Retro-trajectórias que chegam no dia 5 (18 UTC) aos níveis 700 e 850 hPa aos Olivais.....	85

Figura 42 – Retro-trajectórias que chegam no dia 6 (12 UTC) ao nível 700 e 850 hPa aos Olivais.....	86
Figura 43 – Retro-trajectórias que chegam no dia 7(12 UTC) ao nível 700 e 850 hPa aos Olivais.....	86
Figura 44 – Retro-trajectórias que chegam no dia 8 (18 UTC) a) ao nível 700 e b) 850 hPa aos Olivais.....	87
Figura 45 – Tefograma referente à sondagem aerológicas realizadas na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 5 de Novembro de 1999, 12 UTC	88
Figura 46 – Tefograma referente à sondagem aerológicas realizadas na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 8 de Novembro de 1999, 12 UTC	88
Figura 47 - Concentrações médias diárias de PM ₁₀ registadas nas estações da Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de 4 a 9 de Novembro de 1999	89
Figura 48 – Concentrações médias horárias de PM ₁₀ registadas nas estações da Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de 4 a 9 de Novembro de 1999.	90
Figura 49 – Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM ₁₀ registados na estação dos Olivais, 4 a 9 de Novembro de 1999.....	90
Figura 50 - Concentrações horárias de NO _x e de PM ₁₀ na estação dos Olivais, 4 a 9 de Novembro de 1999	91
Figura 51 - Concentrações horárias de NO _x e de PM ₁₀ na estação do Lavradio, 4 a 9 de Novembro de 1999	92
Figura 52 - Análise do campo da pressão ao nível médio domar (ECMWF), 25 e 26 de Fevereiro de 2000, 12 UTC	94
Figura 53 - Análise do campo da pressão ao nível médio do mar e da pseudo-temperatura potencial do termómetro molhado aos 850 hPa (ECMWF), 28 de Fevereiro de 2000, 12 e 06 UTC, respectivamente.....	94
Figura 54 - Análise do campo do geopotencial aos 500 hPa (ECMWF), a) 26 e b) 28 de Fevereiro de 2000, 12 UTC	95

Figura 55 - Análise do campo do geopotencial aos 850 hPa (ECMWF), 26 de Fevereiro de 2000, 12 UTC	95
Figura 56 – - Análise dos campos do geopotencial a) aos 700 hPa (18 UTC) e b) ao nível médio do mar (12 UTC) (ECMWF), dos dias 26 e 29 de Fevereiro 2000 ...	96
Figura 57 – Análise dos campos do geopotencial dos 850 hPa (ALADIN) do dia 25 (0 e 12 UTC) e 27 de Fevereiro de 2000 (0 e 12 UTC)	97
Figura 58 – Retro-trajectória que chega no dia 26 (12 UTC) aos níveis 700 e 850 hPa aos Olivais.....	98
Figura 59 – Retro-trajectória que chega no dia 27 (0 UTC) ao nível 700 hPa aos Olivais	99
Figura 60 – Retro-trajectórias que chegam no dia 28 (9 UTC) aos níveis 700, 850 e 925 hPa aos Olivais.....	99
Figura 61 - Imagem de satélite seaWIFS do dia 28 de Fevereiro de 2000 (acedida em 19.12.2005)	100
Figura 62 - – Tefigrama referente à sondagem aerológica realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 25 de Fevereiro de 2000, às 0 UTC	101
Figura 63 - – Tefigrama referente à sondagem aerológica realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 26 de Fevereiro de 2000, às 0 UTC	101
Figura 64 - Concentrações médias diárias de PM ₁₀ referentes às estações da Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de 25 a 29 de Fevereiro de 2000	102
Figura 65 - Concentrações médias horárias de PM ₁₀ registadas nas estações da Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, no período de 25 a 29 de Fevereiro de 2000	103
Figura 66 - Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM ₁₀ registados na estação dos Olivais, 25 a 29 de Fevereiro de 2000	103
Figura 67 – Concentrações horárias de a) NO _x e PM ₁₀ na estação dos Olivais, b) NO _x nas estações Av. Liberdade, Entrecampos, Olivais e Lavradio, 25 a 29 de Fevereiro de 2000	104

Figura 68 - Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF), a) 30 de Maio, b) 1 e c) 2 de Junho de 2002, 12 UTC	106
Figura 69 - Análise do campo do geopotencial aos 500 hPa (ECMWF), 30 de Maio de 2002, 12 UTC	106
Figura 70 - Análise do campo do geopotencial aos 850 hPa (ECMWF), 29 e 30 de Maio de 2002, 12 UTC.....	107
Figura 71 -- Análise do campo do geopotencial aos 700 hPa (ECMWF)a) 29 (12 UTC) e b) 30 (18 UTC) de Maio de 2002	107
Figura 72 – Análise do campo da temperatura aos 850 hPa (ECMWF), 30 de Maio de 2002, 18 UTC	108
Figura 73 - Análise do campo do vento aos 850 hPa (ALADIN), 29 de Maio de 2002, 0 e 12 UTC	109
Figura 74 – Retro-trajectórias da partícula que chega no dia a) 30 às 12UTC, b) 31 às 12 UTC, c) 1 às 15 UTC e d) 2 às 12 UTC, ao nível 850 hPa aos Olivais.....	110
Figura 75- Imagem de satélite MODIS do dia 29 de Maio de 2002, 11h20 UTC (acedida no dia 1.12.05)	110
Figura 76 – Tefigrama referente à sondagem aerológica realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, do dia 30 de Maio de 2002, 0 UTC	111
Figura 77 - Concentrações médias diárias de PM ₁₀ registadas nas oito estações em funcionamento no período em questão.....	112
Figura 78 - Concentrações médias horárias de PM ₁₀ registadas nas sete estações que excederam o valor limite, referentes a 29 de Maio a 2 de Junho de 2002	113
Figura 79 - Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM ₁₀ registados na estação dos Olivais, 29 de Maio a 2 de Junho de 2002.....	113
Figura 80 - Concentrações médias horárias de PM _{2.5} e PM ₁₀ registadas na estação de Entrecampos, 29 de Maio a 2 de Junho de 2002.....	114
Figura 81 - Concentrações horárias a) NO _x e de PM ₁₀ registada na estação dos Olivais b) NO _x registada nas estações de Entrecampos, Olivais, Av. de Liberdade e Quebedo, 29 de Maio a 2 de Junho de 2002	114

Figura 82 – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF), a) 23, b) 25, c) 26 e d) 22 de Julho de 2002, 12 UTC	116
Figura 83 - Análise do campo do geopotencial aos 500hPa (ECMWF),a) 22 (12 UTC), b) 23 (18 UTC).....	117
Figura 84 - Análise do campo do geopotencial aos 500hPa (ECMWF), 26 (12 UT Observa-se distribuição semelhante dos centros de acção aos 700 hPa.	117
Figura 85 – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF) (23 (12 UTC)) e da temperatura aos 850 hPa (25 (18 UTC))	118
Figura 86 – Análise da pressão ao nível médio do mar (ALADIN), 24 e 25 de Julho (12 UTC).....	118
Figura 87 – Análise do campo do vento aos 850 hPa (ALADIN) a) 24, b) 25, c) 26 (12 UTC) e aos 1000 hPa d) 25 (12 UTC)	119
Figura 88 – Retro-trajectória da partícula que chega no dia 23 (12 UTC) ao nível 850 hPa aos Olivais.....	120
Figura 89 – Retro-trajectórias da partícula que chega no dia 24 (12 UTC) aos a) 850 hPa e b) 925 hPa aos Olivais	121
Figura 90 – Retro-trajectórias da partícula que chega aos Olivais: no dia 25, às 12 UTC, a)aos 850 hPa b) aos 925 hPa; no dia 26, às 12 UTC c) aos 850 hPa d) aos 925 hPa	122
Figura 91 -Tefigrama referente à sondagem aerológica, realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, no dia 24 (0 UTC).....	123
Figura 92 -Tefigrama referente à sondagem aerológica, realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, no dia 24 (12 UTC).....	123
Figura 93 -Tefigrama referente à sondagem aerológica, realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, no dia 25 (0 UTC).....	124
Figura 94 -Tefigrama referente à sondagem aerológica, realizada na estação de Lisboa Gago Coutinho, no dia 25 (12 UTC).....	124
Figura 95 - Concentrações médias diárias de PM ₁₀ registadas nas oito estações que estavam em funcionamento no período em questão	125

Figura 96 - Concentrações médias horárias registadas nas sete estações que excederam o valor limite, no período de 22 a 26 de Julho de 2002	125
Figura 97 - Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM_{10} registados na estação dos Olivais, 22 a 26 de Julho de 2002.....	126
Figura 98 - Concentrações médias horárias de $PM_{2.5}$ e PM_{10} registadas na estação de Entrecampos, 22 a 26 de Julho de 2002	126
Figura 99 - Concentrações de NO_x registadas nas estações dos Olivais, Entrecampos, Av. Liberdade e Quebedo, 22 a 26 de Julho de 2002	127
Figura 100 – Análise do campo da pseudo-temperatura potencial do termómetro molhado aos 850 hPa (ECMWF) dos dias 27 (0 UTC); 30 (6 UTC); 31 (18 UTC); 1 (12 UTC).....	129
Figura 101 – Análise do campo da pressão ao nível médio do mar (ECMWF) do dia a) 28 (12 UTC); b) 30 (18 UTC); c) 29 (0 UTC); d) 31 (6 UTC)	129
Figura 102 – Análise do campo do geopotencial aos 850 hPa: a) 28 (12 UTC); b) 31 (0 UTC); aos 500 hPa c) 28 (18 UTC); d) 31 (06 UTC).....	130
Figura 103 – Análise do campo do vento aos 850 hPa (ALADIN) no dia 28 (0 e 12 UTC) e 29 de Dezembro (0 e 12 UTC)	131
Figura 104 - Análise do campo do vento aos 850 hPa (ALADIN) do dia 30 de Dezembro, às 12 UTC	132
Figura 105 - Concentrações médias diárias de PM_{10} registadas nas 13 estações que estavam em funcionamento no período de 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003.....	133
Figura 106 - Concentrações médias horárias de PM_{10} registadas nas estações que excederam o valor limite, no período de 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003	134
Figura 107 - Concentrações médias horárias registadas nas estações dos Olivais e da Chamusca, no período de 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003	134

Figura 108 – Valores horários da intensidade e do rumo do vento, registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, e da concentração de PM_{10} registados na estação dos Olivais, 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003.....	135
Figura 109 – Valores horários de concentração de PM_{10} , registados na estação dos Olivais, e de quantidade de precipitação registados na estação de Lisboa Gago Coutinho, 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003	135
Figura 110 - Concentrações de NO_x registadas nas estações dos Olivais, Entrecampos, Av. Liberdade, Quebedo, Lavradio e Chamusca, 27 de Dezembro de 2002 a 1 de Janeiro de 2003	136

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Constituição química e fontes de partículas finas e grosseiras (adaptado de Seinfeld e Pandis, 1998 e Tente, 2005)	23
Tabela 2 – Estações da rede de monitorização da qualidade do ar da CCDR-LVT ...	53
Tabela 3 – Campos dos modelos ECMWF e ALADIN	58
Tabela 4 – Classes de situação sinóptica	69
Tabela 5 – Coeficientes do modelo de regressão linear múltipla	79
Tabela 6 – Total da variância explicada.....	80
Tabela 7 – Matriz de componentes da ACP com rotação varimax normalizada.....	81
Tabela 8 – Resumo das condições que predominaram durante cada episódio	138

